ALBERT EINSTEIN

EVOLUȚIA FIZICII

ALBERT EINSTEIN
LEOPOLD INFELD

EVOLUȚIA FIZICII

dezvoltarea ideilor de la primele concepte la teoria relativității și teoria cuantelor

PREFAȚĂ

Înainte de a începe să citiți această carte, vă așteptați, pe drept, să vi se lămurească unele chestiuni simple. Cu ce intenție a fost scrisă și cine este cititorul închipuit de noi căruia i se adresează?

Este greu să se răspundă de la început în mod clar și convingător la aceste întrebări. Ar fi mult mai ușor să se dea răspunsul, de altfel devenit inutil, la sfîrșitul cărții. Găsim că este mai simplu să precizăm ceea ce nu pretinde a fi cartea de față. Nu am scris o carte de fizică, o expunere sistematică a faptelor și teoriilor elementare ale fizicii. Intenția noastră a fost mai de grabă de a schița, în linii mari, eforturile depuse de spiritul omenesc pentru a stabili o legătură între lumea ideilor și cea a fenomenelor. Am încercat să înfățișăm forțele active care obligă știința să găsească idei corespunzătoare realității lumii noastre. Dar expunerea noastră trebuie să fie simplă. Prin labirintul faptelor și conceptelor, a trebuit să alegem calea cea mai dreaptă care ni s-a părut cea mai caracteristică și mai semnificativă. Faptele și teoriile care nu se găseau pe această cale, au trebuit să fie omise. Ținta noastră principală ne-a silit să facem o alegere corespunzătoare a faptelor și a teoriilor prezentate. Importanța unei probleme nu trebuie cîntărită după numărul de pagini care îi sînt consacrate. Anumite linii esențiale ale gîndirii au fost lăsate la o parte, nu pentru că ni s-au părut lipsite de importanță, ci pentru că ele nu se găseau pe drumul ales.

În timpul redactării cărții am discutat mereu între

noi asupra caracteristicilor cititorului nostru închipuit și ne-am neliniștit mult pentru dînsul. După părerea noastră, el ar trebui să-și compenseze, printr-un număr apreciabil de calități, lipsa totală de cunoștințe concrete de fizică și matematică. Printre altele ni-l închipuim animat de interes pentru ideile fizice și filosofice și nu ne-am putut opri de a admira răbdarea cu care luptă spre a-și croi drum prin pasagiile mai puțin interesante, dar mai anevoioase. El își dă seama că pentru a înțelege o pagină anumită este indispensabil să fi citit cu atenție cele precedente. El știe că nu-i este îngăduit să citească o carte științifică ca un roman, oricît de popular ar fi scrisă.

Cartea este o discuție fără pretenții între dumneavoastră și noi, chiar dacă o veți găsi anostă sau interesantă, searbădă sau captivantă; scopul nostru îl socotim atins de îndată ce aceste pagini vor fi reușit să vă dea o idee despre lupta eternă purtată de spiritul creator al omului pentru înțelegerea mai adîncă a legilor care guvernează fenomenele fizice.

A. E.
L. I.

I. ASCENSIUNEA CONCEPŢIEI MECANICISTE

Marea poveste a tainelor naturii. — Prima idee conducătoare. — Vectorii. — Enigma mişcării. — Încă o idee conducătoare. — Este căldura o substanţă ? — Montagnes russes. — Raportul de transformare. — Concepţiile filosofice. —Teoria cinetică a materiei.

§ 1. MAREA POVESTE A TAINELOR NATURII

În închipuirea noastră se conturează o poveste minunată cu întimplări ale căror împrejurări sînt tainice. Aceste întîmplări sînt toate firele conducătoare esenţiale şi ne forţează să construim noi înşine teoria celor întîmplate. Dacă urmărim cu atenţie intriga, ajungem la soluţia completă înainte ca autorul să ne-o dezvăluie la sfîrşitul cărţii. Soluţia însăşi, contrar romanului detectiv de calitate inferioară, nu ne dezamăgeşte ; mai mult, ea apare tocmai în momentul în care am aşteptat-o.

Putem oare asimila pe cititorul unei astfel de cărţi cu oamenii de ştiinţă, care din generaţie în generaţie continuă să caute dezlegarea tainelor pe care le conţine cartea naturii ? Comparaţia este falsă şi va trebui părăsită în cele ce urmează ; ea cuprinde, totuşi, o anumită justificare şi de aceea trebuie extinsă şi modificată astfel încît să pună într-o lumină mai justă eforturile ştiinţei de a dezlega misterul Universului.

Această mare poveste a tainelor naturii nu s-a sfîrşit. Nici nu sîntem siguri că există un sfîrşit. Dar numai citirea poveştii ne-a dezvăluit multe dintre secrete ; ea ne-a deprins să înţelegem graiul naturii, ea ne-a permis să înţelegem multe din căile de dezvoltare şi a fost un nesecat izvor de bucurii şi un imbold statornic în

mersul înainte, adeseori anevoios, al științei. Dar sîntem conștienți că cu toate volumele citite și răstălmăcite, sîntem încă departe de soluția finală, admițînd că există o astfel de soluție. După fiecare etapă străbătută căutăm o nouă explicație, compatibilă cu toate datele stabilite anterior. Anumite teorii și ipoteze au explicat o sumedenie de fapte dar nu există o soluție compatibilă cu tot ceea ce cunoaștem despre natură. Adeseori o teorie, în aparență perfectă, s-a dovedit inadecvată în lumina unei noi lecturi. Fapte noi apar care o contrazic sau care nu sînt explicate prin această teorie. Cu cît citim mai mult, cu atît admirăm mai din plin structura acestei cărți, chiar dacă soluția completă pare să se îndepărteze, pe măsură ce avansăm cu cititul.

Aproape în fiecare roman polițist, începînd de la minunatele povestiri ale lui Conan Doyle, sosește o dată momentul cînd detectivul și-a strîns întregul material de fapte, necesar pentru o anumită fază a problemei sale. Aceste fapte par adesea stranii, incoerente și fără nici o legătură între ele. Marele detectiv își dă seama însă, că, pentru moment, nu este nevoie să întreprindă noi investigații și că numai reflexia pură va putea stabilii o corelație între faptele adunate. Cîntă la vioară sau se întinde în jilț trăgînd din pipă, și dintr-o dată — minune! — a găsit, în adevăr, soluția. Și nu numai că a găsit o explicație pentru faptele existente, dar își dă seama că trebuie să se fi petrecut și alte evenimente. Și cum știe acum exact unde trebuie să cerceteze, el poate porni, dacă-i place, în căutarea unor alte evenimente pentru a-și culege noi confirmări ale teoriei sale.

Omul de știință, care citește cartea naturii, dacă ne este îngăduit să repetăm această frază uzată, trebuie să găsească soluția el singur, căci el nu poate face ca cititorii nerăbdători ai altor romane, să sară la finele cărții. În cazul nostru, cititorul este, în același timp, și detectivul care se străduiește să explice, cel puțin în parte, legătura dintre evenimente și bogatul lor conținut. Pentru a obține numai o soluție parțială, omul de știință trebuie să strîngă la un loc faptele neordonate, de care dis-

pune, să le facă coerente și inteligibile cu ajutorul gîndirii creatoare.

În paginile ce urmează, ne-am propus să descriem în linii mari acea operă a fizicienilor, ce corespunde gîndirii pure a cercetătorului. Ne vom ocupa în special cu rolul pe care l-au jucat gîndirea și ideile în urmărirea aventuroasă a cunoașterii lumii fizice.

§ 2. PRIMA IDEE CONDUCĂTOARE

Încercările de a citi marea carte a tainelor naturii se împletesc cu începuturile gîndirii omenești. Dar, abia cu aproape trei sute de ani în urmă au început oamenii de știință să descifreze limbajul cărții. Începînd de atunci, din epoca lui Galileu și Newton, lectura a înaintat repede. S-a dezvoltat tehnica cercetării și metodele sistematice de depistare și urmărire a ideilor conducătoare. Unele enigme ale naturii au putut fi astfel dezlegate, deși multe din soluțiile dobîndite s-au dovedit a fi provizorii și superficiale, în lumina cercetărilor ulterioare.

O problemă fundamentală, care din cauza caracterului ei complicat a rămas mii de ani învăluită în negură, este cea a mișcării. Toate mișcările pe care le observăm în natură, mișcarea pietrei aruncată în aer, a vaporului care străbate marea, a unei căruțe împinsă pe drum, sînt în realitate foarte complicate. Pentru a putea înțelege aceste fenomene este cuminte să începem cu cazurile cele mai simple cu putință, trecînd apoi treptat la cazurile mai complicate. Să considerăm un corp în repaus, deci un corp în stare de nemișcare. Pentru a-i schimba poziția este necesar să exercităm o acțiune asupra lui, împingîndu-l, ridicîndu-l sau supunîndu-l acțiunii altor corpuri, cum ar fi caii sau mașinile cu abur. Intuiția ne sugerează o legătură între mișcare și acțiunea de împingere, ridicare sau tragere. Experiențele repetate ne îndeamnă să riscăm afirmația suplimentară că pentru a-i da corpului o mișcare mai rapidă, trebuie să-l împingem mai puternic. Pare firesc să tragem concluzia, că viteza unui corp este cu atît mai mare, cu cît acțiunea, care se exercită asupra lui este mai puternică. O căruță trasă de patru

cai merge mai repede, decît una trasă numai de doi. Intuiţia ne îndeamnă deci să spunem, că între viteză şi acţiunea exterioară este o legătură esenţială.

Cititorilor de romane poliţiste le este familiar faptul că o cale greşită complică acţiunea şi întîrzie dezlegarea cazului. Metoda de a raţiona dictată de intuiţie a fost greşită şi a condus la o concepţie falsă asupra mişcării, concepţie ce s-a menţinut totuşi secole de-a rîndul. Marea autoritate a lui Aristotel în întreaga Europă a fost poate cauza principală a încrederii persistente în această reprezentare intuitivă. În *Mecanica,* lucrare care se atribuie de două mii de ani lui Aristotel, putem citi :

„Corpul aflat în mişcare se opreşte cînd forţa care îl împinge îşi încetează acţiunea".

Descoperirea şi folosirea raţionamentului ştiinţific de către Galileu reprezintă una dintre cele mai importante cuceriri din istoria gîndirii omeneşti şi marchează adevăratul început al fizicii. Această descoperire ne-a învăţat că nu trebuie întotdeauna să ne încredem în concluzii intuititve, bazate pe observaţii directe, căci ele ne duc, uneori, pe o cale greşită.

Dar prin ce este greşită intuiţia ? Poate oare fi greşită afirmaţia că o căruţă trasă de patru cai trebuie să meargă mai repede, decît una trasă de doi cai ?

Să cercetăm mai îndeaproape elementele fundamentale ale mişcării, plecînd de la experienţe simple luate din viaţa de toate zilele, familiare omenirii încă de la începuturile civilizaţiei şi agonisite în lupta pentru existenţă.

Să presupunem că o persoană care împinge un cărucior pe un drum neted încetează brusc să-l mai împingă. Căruciorul va mai parcurge o distanţă scurtă înainte de a se opri. Ne întrebăm, cum s-ar putea mări această distanţă ? Există mai multe modalităţi de a realiza aceasta, de exemplu ungînd roţile, sau netezind şi mai mult drumul. Cu cît roţile se vor roti mai uşor, cu cît drumul va fi mai neted, cu atît căruciorul va străbate o distanţă tot mai mare, înainte de a se opri. Dar ce se realizează prin ungere şi netezire ? Nimic altceva decît o micşorare a influenţelor exterioare. S-a redus ceea ce numim frecarea

roților cu axul precum și frecarea dintre roți și drum. Explicația aceasta reprezintă o interpretare teoretică a faptelor observate, dar care este încă arbitrară. Dacă mai facem încă un pas esențial am găsit adevăratul fir conducător. Să ne închipuim un drum perfect neted și un cărucior ale cărui roți să fie lipsite cu desăvîrșire de frecare. În aceste condiții n-ar mai exista nimic care să oprească căruciorul, astfel că el ar trebui să-și continue neîncetat mișcarea. La concluzia aceasta se ajunge numai reflectînd asupra unei experiențe idealizate care nu poate fi niciodată realizată efectiv, întrucît este imposibil să se elimine toate influențele exterioare. Această experiență idealizată ne-a dat cheia care a deschis calea pe care s-au pus bazele mecanicii mișcării.

Comparînd cele două moduri de a găsi soluția problemei, putem spune : concepția intuitivă ne spune că cu cît este mai mare acțiunea cu atît mai mare este viteza. Viteza ne arată dacă asupra unui corp acționează sau nu forțe exterioare. Faptul nou descoperit de Galileu este : un corp care nu este nici împins, nici tras sau acționat altcumva, sau pe scurt, dacă nici o forță exterioară nu se exercită asupra lui, acesta rămîne în repaus sau se mișcă uniform și rectiliniu, adică cu aceeași viteză de-a lungul unei drepte. Asfel, viteza nu indică dacă asupra unui corp acționează sau nu forțe exterioare. Concluzia lui Galileu, care s-a dovedit a fi cea corectă, a fost formulată, cu o generație mai tîrziu, de Newton, ca *lege a inerției*. De obicei, această lege este primul lucru care se învață pe de rost la școală, și poate unii și-o mai amintesc :

„Orice corp își menține starea de repaus sau de mișcare uniformă și rectilinie dacă nu este obligat de către forțe exterioare să-și schimbe această stare".

Am văzut că această lege a inerției nu poate fi dedusă direct din experiență, ci numai printr-un proces de abstractizare al gîndirii în concordanță cu observația. O experiență idealizată nu poate fi niciodată realizată efectiv, deși ea conduce la o înțelegere profundă a experiențelor reale.

Din varietatea de mișcări din lumea înconjurătoare,

să alegem ca prim exemplu, mişcarea rectilinie şi uniformă. Ea este cea mai simplă deoarece nu este produsă de nici o forță exterioară. Mişcarea rectilinie şi uniformă nu poate fi însă realizată niciodată ; o piatră aruncată dintr-un turn, un cărucior împins pe drum, nu pot niciodată să se miște în mod riguros rectiliniu, și uniform, deoarece nu putem elimina influența forțelor exterioare.

Într-un bun roman polițist, indicațiile cele mai evidente duc deseori la ipoteze greşite. Tot astfel şi in cursul încercărilor noastre de a înțelege legile naturii, constatăm de asemenea că explicația intuitivă cea mai directă este deseori greșită.

Gîndirea omenească creează imagini mereu schimbătoare despre lume. Contribuția lui Galileu a distrus punctul de vedere intuitiv şi l-a înlocuit printr-unul nou. Acesta este sensul descoperirii lui Galileu.

Dar se naște imediat o altă întrebare în legătură cu mișcarea. Dacă viteza nu este o indicație a acțiunii unor forțe exterioare care solicită corpul, care este atunci acea indicație ? Răspunsul la această întrebare fundamentală a fost găsit de Galileu, şi mai tîrziu a fost formulat mai concis de Newton. El constituie o nouă idee conducătoare în investigația noastră.

Pentru a găsi răspunsul corect, trebuie să reflectăm ceva mai profund asupra cazului cu căruciorul care înaintează pe un drum perfect neted. În experiența noastră idealizată, caracterul rectiliniu și uniform al mişcării se datora absenței oricărei forțe exterioare. Să presupunem acum că i se dă căruciorului, care se mișcă uniform, un impuls în direcția mişcării sale. Ce se va întîmpla atunci? Evident că el își va iuți mișcarea. Tot atît de limpede este că un impuls în direcția opusă mişcării va produce o micșorare a vitezei. În primul caz, mişcarea căruciorului a fost accelerată de impuls, în cazul al doilea, încetinită. De aici rezultă numaidecît că acțiunea unei forțe exterioare modifică viteza. Aşadar, nu viteza însăși, ci variația ei este consecința împingerii sau a tragerii. O forță mărește sau micşorează viteza, după cum acționează în sensul mişcării sau în sens contrar. Galileu a văzut clar acest fapt pe care l-a formulat în lucrarea sa *Două științe noi* :

„...orice viteză o dată imprimată unui mobil se conservă riguros neschimbată, atîta vreme cît lipsesc cauze exterioare de accelerare sau întîrziere, condiţie realizată numai pe un plan orizontal, deoarece la planele care coboară există implicit o cauză de accelerare, pe cînd la cele care suie există o acţiune de întîrziere; de aici urmează că mişcarea pe un plan orizontal este o mişcare perpetuă, căci, dacă viteza este constantă, mişcarea nu poate fi micşorată sau încetinită şi cu atît mai puţin anihilată".

Urmînd firul conducător cel bun, putem să ajungem la o înţelegere mai adîncă a problemei mişcării. Legătura dintre forţă şi variaţia vitezei — nu legătura dintre forţă şi viteza însăşi, cum am putea gîndi bazîndu-ne exclusiv pe intuiţie — este baza mecanicii clasice, aşa cum a fost formulată de Newton.

Ne-am folosit de două noţiuni, care joacă un rol fundamental în mecanica clasică : forţa şi variaţia vitezei. In cursul dezvoltării ulterioare a ştiinţei, aceste noţiuni au fost extinse şi generalizate. Trebuie să le examinăm aşadar, mai îndeaproape.

Ce este forţa ? Intuitiv, noi simţim ce trebuie să înţelegem prin această expresie. Noţiunea aceasta rezultă din efortul desfăşurat la împingere, aruncare sau tragere, din senzaţia musculară care însoţeşte fiecare din aceste acte. Dar generalizarea ei depăşeşte mult cadrul acestor exemple simple. Putem să ne gîndim la o forţă fără a ne reprezenta un cal care trage o căruţă. Vorbim despre forţa de atracţie dintre Soare şi Pămînt, dintre Pămînt şi Lună, precum şi de forţele care produc flxul şi refluxul. Vorbim despre forţa cu care Pămîntul ne reţine în sfera sa de influenţă pe noi şi toate lucrurile din jurul nostru şi despre forţa cu care vîntul produce valurile mării sau agită frunzele copacilor. Cînd şi unde constatăm o variaţie a vitezei, este răspunzătoare o forţă exterioară în sensul cel mai general. Newton scrie în *Principia:*

„Forţa activă este o acţiune exercitată asupra unui corp, în scopul de a-i schimba starea de repaus sau de mişcare rectilinie şi uniformă.

Această forţă rezidă numai în acţiunea însăşi şi nu rămîne în corp, cînd acţiunea a încetat, căci un corp îşi menţine orice nouă stare căpătată exclusiv prin *vis inertiae.* Forţele active pot avea origini diferite cum este percuţia, presiunea, forţa centripetă".

Dacă o piatră este aruncată dintr-un turn, mişcarea ei nu este cîtuşi de puţin uniformă ; viteza ei creşte pe măsură ce cade. Concludem că o forţă exterioară o acţionează în direcţia mişcării. Sau, cu alte cuvinte : Pămîntul atrage piatra. Să luăm un alt exemplu. Ce se întîmplă cînd se aruncă o piatră vertical de jos în sus ? Viteza ei scade, pînă cînd piatra atinge punctul cel mai înalt al traiectoriei sale şi începe, apoi, să scadă. Această scădere a vitezei este produsă de aceeaşi forţă care determină accelerarea cînd piatra este lăsată să cadă ; numai că într-un caz, ea acţionează în direcţia mişcării, iar în cazul celălalt, în direcţia opusă mişcării. Forţa care acţionează este aceeaşi în ambele cazuri, ea produce însă o accelerare sau o încetinire, după cum piatra este lăsată să cadă sau este aruncată în sus.

§ 3. VECTORII

Toate mişcările pe care le-am considerat pînă acum au fost *rectilinii*. Acum trebuie să facem un pas mai departe. Vom înţelege legile naturii analizînd la început cazurile cele mai simple, lăsînd la o parte, în primele încercări, complicaţiile obscure. Evident că o linie dreaptă este mai simplă decît una curbă. Dar nu ne putem mulţumi numai cu înţelegerea mişcării rectilinii. Mişcarea Lunii, a Pămîntului şi a celorlalte planete, adică tocmai mişcările cărora li s-au aplicat cu un succes atît de strălucit principiile mecanicii, se efectuează pe traiectorii curbe. Trecerea de la mişcarea rectilinie la mişcarea pe o traiectorie curbă prezintă noi dificultăţi. Dar trebuie să avem curajul de a le învinge, dacă vrem cu adevărat să înţelegem principiile mecanicii clasice care ne-au furnizat primele idei conducătoare şi au constituit punctul de plecare în dezvoltarea ştiinţei.

Să considerăm o altă experienţă idealizată, în care o sferă perfect lustruită se rostogoleşte uniform pe o masă netedă. Ştim că dacă i se imprimă un impuls, adică, dacă este supusă acţiunii unei forţe exterioare, viteza ei se schimbă. Să presupunem că, de data aceasta, direcţia

impulsului nu coincide, ca în exemplul cu căruciorul, cu direcția mișcării, ci are o direcție cu totul diferită, de exemplu perpendiculară pe direcția mișcării. Ce se va întîmpla acum cu sfera ? Pot fi deosebite trei faze : mișcarea inițială, mișcarea sub acțiunea forței și mișcarea finală, după ce forța a încetat să acționeze. Conform legii inerției vitezele dinaintea și după acțiunea forței sînt constante. Dar există o diferență între mișcarea uniformă dinaintea acțiunii forței și cea de după acțiune și anume : direcția mișcării s-a schimbat. Direcția mișcării inițiale a sferei și direcția forței sînt perpendiculare. Mișcarea finală nu va urma nici una dintre aceste două direcții, ci va fi undeva între ele, și anume mai aproape de direcția forței, dacă impulsul a fost puternic și viteza inițială mică, și dimpotrivă mai aproape de direcția mișcării inițiale, dacă impulsul a fost slab și viteza inițială mare. Noua noastră concluzie bazată pe legea inerției este că, în general, acțiunea unei forțe exterioare nu schimbă numai viteza, ci și direcția de mișcare. Înțelegerea acestui fapt ne-a pregătit îndeajuns pentru a trece la generalizarea introdusă în fizică prin conceptul de *vector*.

Putem continua să folosim și mai departe metoda noastră simplă de a raționa. Punctul de plecare este din nou legea inerției a lui Galileu. Sîntem departe de a fi epuizat toate consecințele acestei idei conducătoare ce rezultă pentru dezlegarea tainei mișcării.

Să considerăm două sfere care se rostogolesc în direcții diferite pe o masă netedă. Pentru a avea o imagine clară să presupunem că cele două direcții sînt perpendiculare între ele. Deoarece nu acționează forțe exterioare, mișcările sînt perfect uniforme. Să mai presupunem că vitezele sînt egale, adică ambele sfere străbat, în același timp, aceeași distanță. Este însă corect să spunem că ambele sfere au aceeași viteză ? Răspunsul este da și nu ! Este drept că dacă aparatele de măsurat vitezele a două automobile indică fiecare patruzeci de mile pe oră, se obișnuiește să se spună că vehiculele au aceeași viteză, indiferent de direcția în care ar înainta. Știința trebuie să-și creeze limbajul și noțiunile ei proprii, pentru propria ei folosință. Inițial, noțiunile științifice coincid deseori cu

cele folosite în limbajul obișnuit utilizat în viața de toate zilele, însă ele se dezvoltă cu totul diferit. Ele se transformă, își pierd ambiguitatea legată de limbajul obișnuit, capătă precizie, astfel încît să poată fi aplicate în cugetarea științifică.

Din punctul de vedere fizic, este avantajos să se spună că vitezele celor două sfere care se mișcă în direcții diferite, sînt diferite. Cu toate că aceasta nu este decît o chestiune de convenție, este mai convenabil să se spună că patru automobile, care la o încrucișare de drumuri apucă pe patru căi diferite, nu au aceeași viteză, chiar dacă, vitezometrele indică toate cincizeci de kilometri pe oră. Această diferențiere dintre viteza ca valoare absolută și viteza ca mărime care are direcție, ilustrează modul cum fizica, pornind de la noțiuni provenite din viața de toate zilele, le preface astfel încît să fie fructuoase pentru dezvoltarea științei.

Cînd măsurăm o lungime, rezultatul se exprimă printr-un anumit număr de unități. Lungimea unui băț poate să fie de 1,20 m etc., greutatea unui obiect anumit poate fi de 3,75 kgf, un interval de timp va fi exprimat printr-un anumit număr de minute sau secunde. În toate aceste cazuri rezultatul măsurării se exprimă printr-un număr. Un număr singur este adesea insuficient pentru descrierea unor anumite concepte fizice. Recunoașterea acestui fapt marchează un însemnat progres în cercetarea științifică. Pentru caracterizarea unei viteze, de exemplu, o orientare este tot atît de esențială ca și un număr. O asemenea mărime care posedă nu numai o valoare numerică, ci și o orientare se numește *vector*. Un simbol potrivit pentru vector este săgeata. Viteza se reprezintă, de obicei, printr-o săgeată sau, în termeni științifici, printr-un vector, a cărui lungime, la o scară aleasă după voie indică valoarea absolută a vitezei și care este orientat pe direcția mișcării.

Dacă patru automobile se îndepărtează de la o răscruce de drum cu aceeași viteză în valoare absolută, dar în direcții diferite, vitezele lor pot fi reprezentate prin patru vectori de aceeași lungime, ca în fig. 1. La scara aleasă, un centimetru reprezintă 20 km/h. Orice viteză

poate fi reprezentată în modul acesta printr-un vector și invers, dacă scara este dată, viteza se poate determina dintr-o astfel de diagramă vectorială.

Dacă două vehicule se întîlnesc pe o șosea și vitezometrele lor indică fiecare 50 km/h, atunci vitezele lor vor fi reprezentate prin doi vectori de aceeași lungime dar cu săgețile îndreptate în sensuri contrare (fig. 2). De asemenea, săgețile care indică (la metrouri) „spre New York", sau „de la New York" trebuie să aibă sensuri contrare. Dar toate trenurile care trec prin stații diferite sau merg pe căi paralele cu același număr de kilometri pe oră au aceeași viteză care trebuie reprezentată printr-un vector unic. Nici unul din elementele vectorului nu indică prin care stații trece trenul, nici pe care căi se deplasează. Cu alte cuvinte, potrivit convenției adoptate, toți vectorii reprezentați în fig. 3 trebuie socotiți egali, deoarece sînt situați în lungul aceleiași drepte sau au direcții paralele, iar săgețile lor sînt îndreptate în același sens. Figura 4 arată vectori diferiți (între ei) deosebindu-se fie prin lungime, fie prin direcție, fie prin amîn-

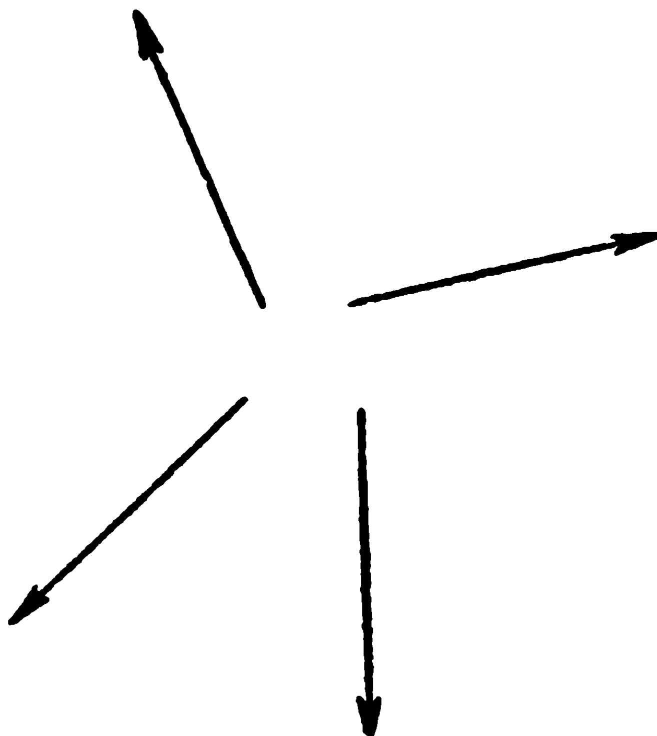


Fig. 1



Fig. 2

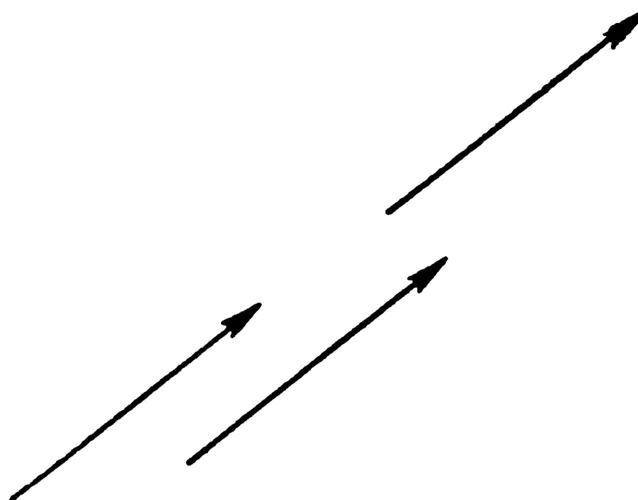


Fig. 3

două. Aceiași patru vectori pot fi figurați în alt mod în care toți pornesc din același punct în direcțiile respective (fig. 5). Cum punctul de plecare nu are importanță, acești vectori pot reprezenta tot așa de bine vitezele a patru vehicule, care pornesc din același punct sau vite-

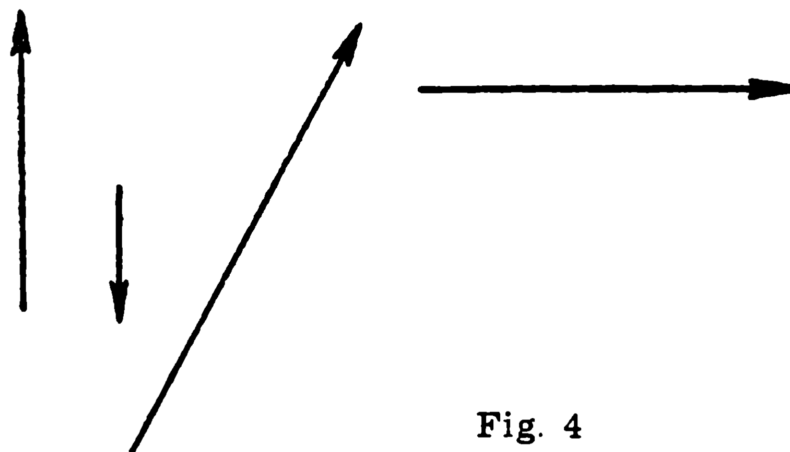


Fig. 4

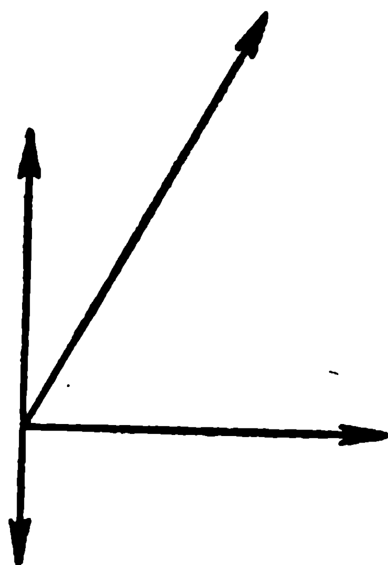


Fig. 5

zele a patru vehicule care se deplasează în diferite regiuni ale țării cu vitezele respective și în direcțiile indicate.

Această reprezentare vectorială poate fi acum folosită pentru a descrie faptele discutate anterior în legătură cu mișcarea rectilinie. Era vorba despre un cărucior, în mișcare uniformă și rectilinie și care, primind un impuls în direcția mișcării își mărește viteza. Grafic, acesta se reprezintă prin doi vectori, cel mai scurt indicînd viteza anterioară impulsului și unul mai lung, dar cu aceeași orientare, indicînd viteza căpătată după impuls (fig. 6). Este clară semnificația vectorului punctat: el reprezintă variația de viteză, de care este responsabil, după cum știm, impulsul. În cazul în care forța acționează în sens contrar mișcării, încetinind-o, diagrama se prezintă puțin diferit. Vectorul punctat reprezintă și în cazul acesta variația vitezei, dar sensul lui este inversat (fig. 7). Este evident că nu numai viteza însăși, dar

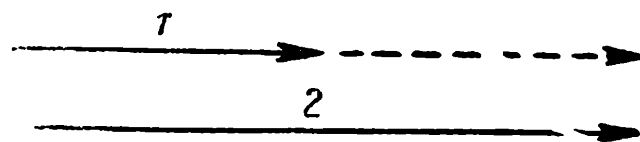


Fig. 6

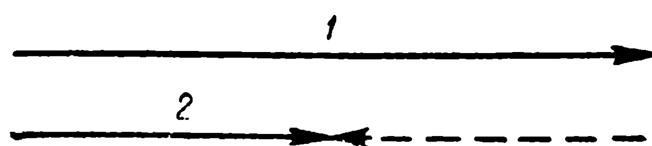


Fig 7

şi variaţia ei este un vector. Cum orice variaţie de viteză este cauzată de acţiunea unei forţe exterioare, forţa trebuie să fie de asemenea reprezentată printr-un vector. Pentru caracterizarea unei forţe nu este de ajuns să se indice cît de tare este împins căruciorul, ci trebuie precizată şi direcţia în care are loc împingerea. Forţa, întocmai ca viteza şi ca variaţia vitezei, trebuie reprezentată printr-un vector şi nu numai printr-un singur număr. Prin urmare: forţa exterioară este tot un vector şi trebuie să aibă aceeaşi orientare ca şi variaţia vitezei. In cele două figuri din urmă (fig. 6 şi 7), vectorii punctaţi indică atît direcţia forţei cît şi variaţia vitezei.

Scepticul ar putea obiecta că nu vede nici un avantaj în introducerea vectorilor. Tot ce am realizat pînă acum este să transcriem fapte cunoscute într-un limbaj necunoscut şi complicat. În această fază ar fi, în adevăr, greu să-l convingem că punctul lui de vedere este greşit. Ne vedem, deci, nevoiţi să-i dăm dreptate, pentru moment. Dar, vom vedea că tocmai acest limbaj ciudat ne conduce la o generalizare importantă, în care vectorii sînt mărimi esenţiale.

§ 4. ENIGMA MIŞCĂRII

Cîtă vreme ne mărginim numai la studiul mişcării rectilinii, sîntem departe de a înţelege mişcările observate în natură. Trebuie să considerăm mişcările ce au loc pe traiectorii curbe, iar noul nostru pas este să stabilim legile care le guvernează. Aceasta nu este o sarcină uşoară. În cazul mişcării rectilinii, noţiunile de „viteză", „variaţie a vitezei" şi „forţă" s-au dovedit deosebit de utile. Nu ne dăm seama imediat cum am putea să le aplicăm şi mişcărilor pe traiectorii curbe. S-ar putea presupune chiar că vechile noţiuni nu sînt proprii pentru a descrie mişcarea generală şi că trebuie create noţiuni noi. Trebuie să încercăm a urma drumul cel vechi sau să căutăm un altul ?

Generalizarea unui concept este un procedeu folosit curent în ştiinţă. Metodele de generalizare nu sînt univoc determinate căci există numeroase căi de a ajunge la

același rezultat. Există totuși o restricție care trebuie respectată în mod absolut : noțiunea generalizată trebuie să poată fi redusă la cea primitivă, de îndată ce condițiile în care a fost introdusă ultima sînt realizate.

Putem explica aceasta, cel mai bine, chiar prin exemplul cu care ne-am ocupat pînă acum. Să încercăm să generalizăm vechile noțiuni de viteză, variație a vitezei și forță, astfel încît să le putem aplica și mișcării curbilinii. Dintr-un punct de vedere mai general, noțiunea de curbă include și dreapta ; ea este un caz particular, un exemplu simplu de curbă. Prin urmare, aplicînd noțiunile de viteză, variație a vitezei și forță mișcării de-a lungul unei curbe, le aplicăm în mod automat și mișcării rectilinii. Dar rezultatul acesta nu trebuie să contrazică rezultatele stabilite mai înainte. Cînd curba devine o (linie) dreaptă, trebuie să putem reduce toate noțiunile generalizate la cele cunoscute pentru mișcarea rectilinie. Această restricție nu este suficientă ca să determine generalizarea în mod univoc. Ea lasă deschise mai multe posibilități. Istoria științei ne arată că generalizările cele mai simple, uneori se dovedesc a fi fecunde, alteori nu. La început trebuie să facem o presupunere. În cazul nostru este ușor să intuim procedeul corect de generalizare. Noile noțiuni se dovedesc foarte fecunde și ne vor ajuta să înțelegem atît mișcarea unei pietre aruncate, cît și mișcarea planetelor.

Să vedem mai întîi ce este viteza, variația vitezei și forța, în cazul general al mișcării pe o curbă. Vom începe cu viteza. Să presupunem că de-a lungul curbei din figură se mișcă de la stînga spre dreapta un corp foarte mic (fig. 8). Un astfel de corp mic este numit o *particulă*. Punctul de pe curbă indică poziția particulei la un moment dat. Care este viteza particulei în acest moment și în această poziție ? Și de data aceasta descoperirea lui Galileu ne sugerează o modalitate de a introduce noțiunea de viteză. Din nou trebuie să dăm frîu liber fanteziei noastre să imagineze o experiență idealizată. Particula se mișcă în lungul curbei de la stînga la dreapta, sub acțiunea unor forțe exterioare. Să admitem că, la un moment dat și anume tocmai cînd particula trece prin locul in-

dicat de punctul negru din figură, acțiunea tuturor acestor forțe ar înceta brusc. Atunci potrivit legii inerției, mișcarea ar trebui să devină uniformă. Bineînțeles că, în practică, nu putem sustrage nici un corp tuturor acțiunilor exterioare. Putem cel mult să facem o ipoteză : „Ce s-ar întîmpla dacă...?" și să apreciem justețea ipotezei noastre după concluziile care pot fi trase în concordanță cu experiența.



Figura 8.

În fig. 9 vectorul indică direcția ipotetică în care s-ar face mișcarea uniformă din momentul în care s-ar anula toate forțele exterioare.

Aceasta este direcția așa-numitei tangente. Privind la microscop o particulă în mișcare, vedem o porțiune foarte mică a traiectoriei ce apare ca un mic segment.

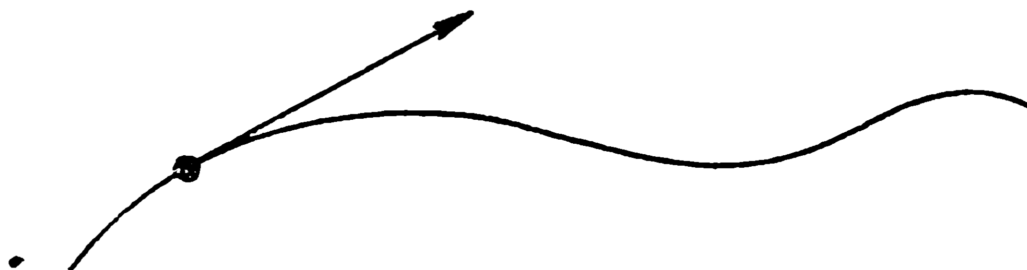


Fig. 9.

Tangenta este prelungirea acestui segment. Prin urmare, vectorul din fig. 9 reprezintă viteza la un moment dat. Vectorul viteză este situat în lungul tangentei. Lungimea lui indică valoarea numerică a vitezei, adică viteza care este indicată de vitezometrele automobilelor.

Experiența noastră idealizată, prin care întrerupem mișcarea pentru a găsi vectorul viteză, nu trebuie luată prea în serios. Ea ne ajută numai să înțelegem ce trebuie să numim vector viteză și ne dă posibilitatea să determi-

năm acest vector într-un punct anumit și la un moment dat.

În fig. 10 sînt reprezentați vectorii viteză pentru trei poziții deosebite ale unei particule care se mișcă pe o curbă. În cazul de față, în cursul mișcării, variază nu numai direcția vitezei, ci și valoarea ei, cum este indicat prin lungimile vectorilor.

Satisface această nouă noțiune de viteză condiția formulată mai sus, pentru orice generalizare ? Cu alte cuvinte, se reduce ea la o noțiune cunoscută, atunci cînd curba se reduce la o dreaptă ? Evident că da. Tangenta la o dreaptă coincide cu dreapta însăși. Vectorul viteză este situat chiar în lungul dreptei, exact ca în exemplele cu căruciorul și cu sfera care se rostogolește.

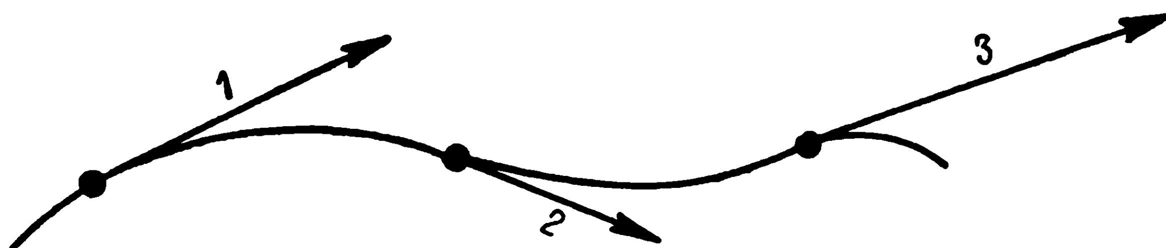


Fig. 10

Pasul următor consistă în introducerea noțiunii de variație a vitezei pentru o particulă care se mișcă pe o curbă. Și aceasta se poate realiza în diferite moduri, dintre care noi alegem pe cel mai simplu și mai convenabil. În fig. 10 am arătat mai mulți vectori viteză ce caracterizează mișcarea în diferite puncte ale traiectoriei. Primii doi îi putem așeza astfel ca să aibă o origine comună, ceea ce, după cum am văzut, este îngăduit în cazul vectorilor. Vectorul punctat îl vom numi variația vitezei. Originea sa coincide cu vîrful primului vector și extremitatea sa cu vîrful vectorului al doilea. La prima vedere această definiție a variației vitezei pare artificială și lipsită de sens. Ea devine mult mai clară în cazul particular în care vectorii *1* și *2* au aceeași direcție. Aceasta echivalează cu trecerea la mișcarea rectilinie. Dacă cei doi vectori au același punct inițial, vectorul punctat unește extremitățile lor. Graficul este acum identic cu cel repre-

zentat în fig. 6 și am regăsit prima noțiune ca un caz particular al celei noi. Trebuie să precizăm că am separat cele două linii din figură, numai pentru că altfel ar coincide și nu s-ar putea distinge (fig. 13).

Acum trebuie să facem ultimul pas în procesul nostru de generalizare. Facem totodată ipoteza cea mai importantă din cele făcute pînă acum. Ne propunem să stabilim legătura dintre forță și variația vitezei, pentru a găsi astfel cheia întregii probleme generale a mișcării.

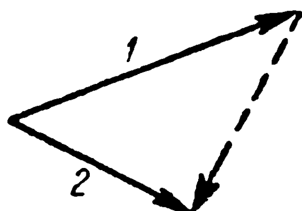


Fig. 11

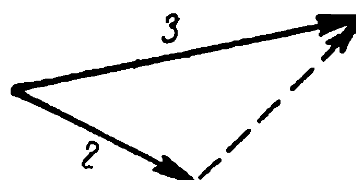


Fig. 12

Cheia explicării mișcării rectilinii a fost simplă: forța exterioară este cauza variației vitezei; vectorul forță și vectorul variație a vitezei au aceeași orientare. Care este acum cheia mișcării curbilinii ? Ei bine, ea este exact aceeași ! Cu deosebirea că, în cazul acesta, noțiunii de variație a vitezei trebuie să-i atribuim o semnificație mai largă. Pentru a ne lămuri este de ajuns să aruncăm o privire asupra vectorilor punctați din fig. 11 și fig. 12. O dată cunoscută viteza în toate punctele unei curbe, se poate deduce imediat direcția forței, în orice punct. Pentru aceasta figurăm vectorii viteză pentru două momente separate printr-un interval de timp foarte scurt, corespunzător la două poziții foarte apropiate. Vectorul cu originea în vîrful primului vector și cu vîrful său în vîrful celui de-al doilea indică direcția forței care acționează. Este esențial ca cei doi vectori viteză să fie separați numai printr-un interval de timp „foarte scurt". Analiza riguroasă a noțiunilor „foarte apropiat" și „foarte scurt" este departe de a fi simplă. În adevăr, tocmai această analiză i-a condus pe Newton și Leibnitz la crearea calculului diferențial.

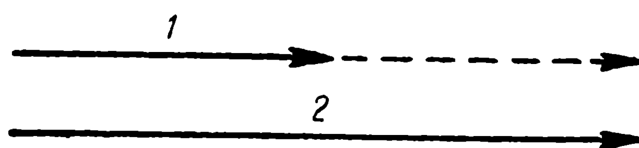


Fig. 13

Un drum anevoios și cu grijă construit a dus la generalizarea ideii lui Galileu. Nu este locul să arătăm aici, cît de bogate și fecunde s-au dovedit consecințele acestei

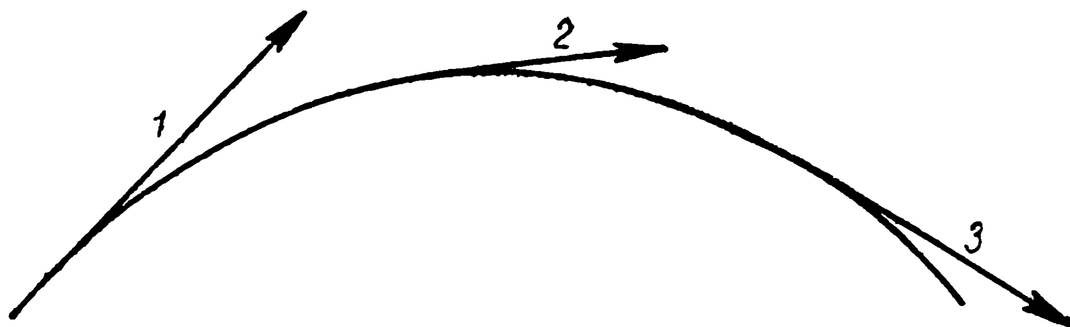


Fig. 14

generalizări. Acest drum conduce la explicații simple și convingătoare a multor fapte care erau neînțelese și discordante în acea vreme.

Din varietatea foarte bogată a mișcărilor, să alegem numai pe cele mai simple și să aplicăm, pentru a le explica, legea formulată mai sus.

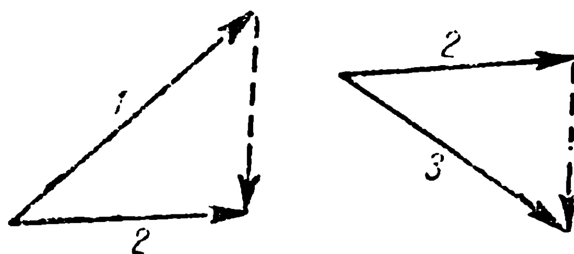


Fig. 15

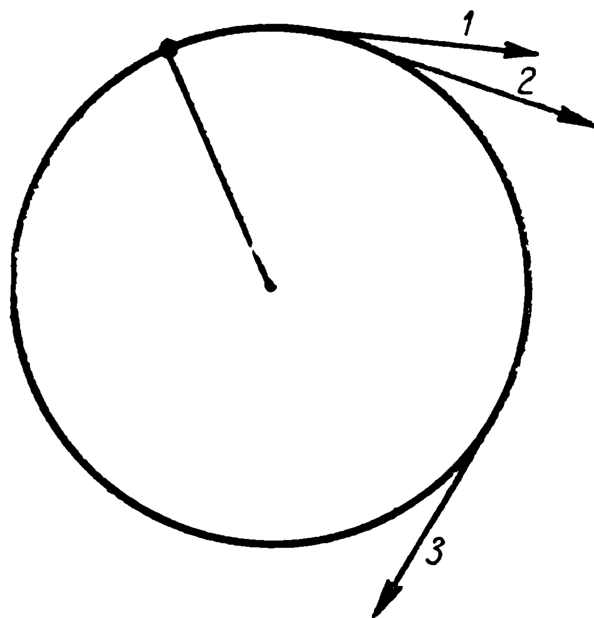


Fig. 16

Un obuz, lansat dintr-un tun, o piatră aruncată oblic în sus, o vînă de apă care țîșnește dintr-un furtun, descriu toate același tip bine cunoscut de traiectorii, anume parabole. Să ne închipuim că am putea adapta un vitezometru unei pietre, astfel încît să fim în măsură să figurăm vectorul viteză în orice moment al mișcării ei. Am obține atunci o reprezentare în genul celei din fig. 14. Direcția forței care solicită piatra este exact direcția variației vi-

tezei și am văzut cum trebuie determinată. Rezultatul indică, după cum arată fig. 15, că forța este verticală și îndreptată de sus în jos. Aceasta se petrece exact la fel ca în cazul pietrei lăsată să cadă din vîrful unui turn. Traiectoriile sînt total diferite, ca și vitezele, dar variația vitezei are aceeași direcție, anume spre centrul Pămîntului.

O piatră fixată de capătul unei sfori și învîrtită într-un plan orizontal descrie o traiectorie circulară (fig. 16). Dacă iuțeala este uniformă, toți vectorii diagramei reprezentative vor avea aceeași lungime. Cu toate acestea, viteza nu este constantă căci traiectoria nu este rectilinie. Numai mișcarea uniformă rectilinie nu implică forțe. Aici însă, există o forță și viteza variază, dacă nu în valoare, totuși în direcție. Potrivit legii de mișcare, trebuie să existe o forță care să producă această variație; această forță, în cazul de față, se exercită între piatră și mîna care ține sfoara. Se naște imediat o nouă întrebare : în ce direcție acționează forța ? Iarăși diagrama vectorială ne dă răspunsul. Figurăm vectorii viteză pentru două puncte foarte apropiate și apoi vectorul variație a vitezei (fig. 17). Acest din urmă vector, după cum se vede, este îndreptat în lungul sforii către centrul cercului și este în permanență perpendicular pe vectorul viteză, respectiv pe tangentă. Cu alte cuvinte, mîna exercită o acțiune asupra pietrei prin mijlocirea sforii.

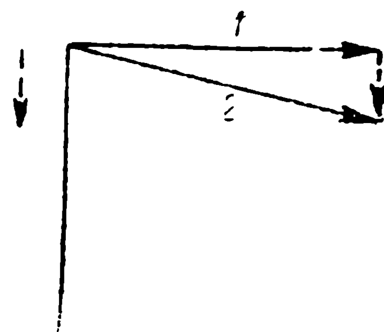


Fig. 17

Foarte asemănător este exemplul mai important al revoluției Lunei în jurul Pămîntului. Aceasta poate fi reprezentată, aproximativ, printr-o mișcare circulară uniformă. Forța este îndreptată spre Pămînt pentru același motiv pentru care în exemplul precedent fusese îndreptată către mînă. Bineînțeles, Pămîntul și Luna nu sînt legate între ele printr-o sfoară, dar ne putem imagina o linie care unește centrele acestor două corpuri cerești ; forța se află de-a lungul acestei linii și este îndreptată către centrul Pămîntului, întocmai ca forța care acțio-

nează asupra unei pietre aruncate oblic sau lăsată să cadă dintr-un turn.

Tot ceea ce am spus pînă acum despre mişcări poate fi rezumat într-o singură formulare: *Forța și variația vitezei sînt vectori care au aceeași orientare.* Aceasta este ideea conducătoare inițială în problema mişcării, dar desigur, ea nu este suficientă pentru explicarea deplină a tuturor mişcărilor observate. Tranziția de la felul de a gîndi al lui Aristotel la cel al lui Galileu a constituit cea mai importantă piatră unghiulară la temelia științei. O dată această cotitură trecută, linia de dezvoltare viitoare devenea clară. Interesul nostru este concentrat acum asupra primelor faze ale acestei dezvoltări, în urmărirea primelor fire conducătoare, în a arăta cum s-au născut noile concepte fizice în lupta grea cu vechile idei. Ne ocupăm numai de munca pionierului în știință, care constă în descoperirea căilor de dezvoltare noi și nebănuite, de cutezanțele gîndirii științifice, care produc o necontenită schimbare a imaginii noastre despre Univers. Primii pași hotărîtori au întotdeauna un caracter revoluționar. Imaginația științifică găsește prea înguste vechile concepte și le înlocuiește prin altele noi. Dezvoltarea continuă, pe calea de acum trasată, păstrează caracterul său evolutiv, pînă ajungem la un punct de cotitură, cînd trebuie cucerit un nou domeniu. Pentru a înțelege, totuși, care motive și care dificultăți ne forțează să introducem o schimbare a conceptelor fundamentale, trebuie să cunoaștem nu numai ideile conducătoare, ci trebuie să cunoaștem și concluziile pe care le putem trage din ele.

Una dintre caracteristicile cele mai importante ale fizicii moderne este că concluziile pe care le stabilește pe baza ideilor inițiale nu sînt numai calitative, ci și cantitative. Să revenim la piatra lăsată să cadă din vîrful unui turn. Am văzut că viteza ei crește în timpul căderii ; am dori să aflăm mai mult. Cît de mare este această creștere ? Care este poziția și viteza pietrei într-un moment oarecare după începerea căderii ei ? Am dori să fim în măsură să prevedem evenimentele și să determinăm prin experiență dacă aceste prevederi, și prin urmare, presupunerile inițiale sînt confirmate.

Pentru a trage concluzii cantitative, trebuie să folosim limbajul matematicii. Majoritatea ideilor fundamentale ale ştiinţei sînt simple şi pot fi, de regulă, exprimate pe înţelesul tuturor. Pentru a urmări însă aceste idei se cere cunoaşterea unei tehnici de cercetare extrem de rafinate. Matematicile, ca instrument de raţionament, sînt necesare dacă vrem să tragem concluzii care pot fi comparate cu experienţa. Cîtă vreme ne mărginim la ideile funda-

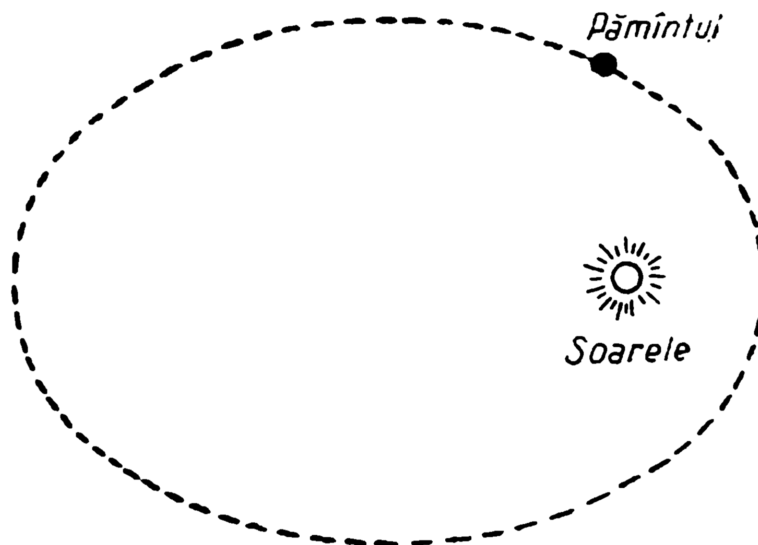


Fig. 18

mentale ale fizicii, ne putem dispensa de limbajul matematicii. Deoarece în aceste pagini noi îl vom evita în mod sistematic, vom fi forţaţi ca, la nevoie, să cităm fără demonstraţie unele dintre rezultatele necesare pentru înţelegerea punctelor de vedere importante care se vor ivi în cursul dezvoltării ulterioare. Preţul care trebuie plătit pentru părăsirea limbajului matematic constituie o pierdere în precizie şi necesitatea de a cita uneori rezultate, fără a arăta cum au fost dobîndite.

Un exemplu foarte important de mişcare este mişcarea Pămîntului în jurul Soarelui. Se ştie că orbita Pămîntului este o curbă închisă numită elipsă (fig. 18). Diagrama vectorială a variaţiei vitezei arată că forţa care se exercită asupra Pămîntului este îndreptată către Soare. Cu aceasta încă n-am aflat mare lucru. Am dori să putem prevedea poziţia Pămîntului şi a celorlalte planete la un moment dat, să prevedem data şi durata eclipsei

de Soare următoare şi multe alte fenomene astronomice. Aceasta este posibil, dar nu numai pe baza primului nostru element căci, în afară de direcția forței, trebuie să cunoaştem și valoarea ei absolută, mărimea ei. Din impasul acesta ne-a scos Newton printr-o intuiție inspirată. Potrivit *legii gravitației,* enunțată de el, forța de atracție dintre corpuri depinde într-un mod simplu de distanța dintre ele. Cu cît distanța este mai mare, cu atît atracția este mai mică. Mai precis : dacă distanța se dublează, forța de atracție devine de 2 × 2 = 4 ori mai mică, cînd distanța se triplează, forța devine de 3 X 3= 9 ori mai mică etc.

Vedem astfel că în cazul atracției gravitaționale am reuşit să exprimăm într-un mod simplu, felul în care depinde forța de distanța care separă două corpuri în mişcare. Procedăm analog și în toate celelalte cazuri, în care este vorba de forțe de altă natură, de exemplu forțe electrice, magnetice etc. Încercăm să întrebuințăm o expresie simplă pentru forța dată, dar o asemenea expresie este justificată numai dacă concluziile deduse din ea sînt confirmate de experiență.

Dar cunoașterea forței gravitaționale singură nu este suficientă pentru a descrie mișcarea planetelor. Am văzut că vectorii reprezentativi ai forței și variației de viteză au aceeași direcție pentru intervale de timp scurte, dar trebuie să urmărim cu un pas mai departe pe Newton și să admitem o relație simplă între lungimile acestor vectori. În condiții identice, adică, pentru unul și același corp mobil și pentru variații în intervale de timp egale, variația vitezei este, după Newton, proporțională cu forța.

Prin urmare, pentru a stabili concluzii cantitative cu privire la mișcarea planetelor, sînt necesare numai două ipoteze complementare. Una are caracter general și exprimă relația dintre forță și variația vitezei. Cealaltă are caracter particular, ea stabilește o dependență exactă între un tip special de forță și distanța dintre două corpuri. Prima este legea generală a mișcării, a lui Newton, cea de-a doua este legea gravitației ; ele determină, împreună, mișcarea. Acestea pot fi lămurite prin următorul raționament, puțin cam greoi. Să admitem că am determinat, la un moment dat, poziția și viteza unei pla-

nete, precum și forța care acționează asupra ei. Atunci, din legea mișcării, a lui Newton, aflăm variația vitezei pentru un interval de timp scurt. Cunoscînd atît viteza inițială cît și variația ei, putem determina viteza și poziția planetei la sfîrșitul intervalului de timp. Repetînd (de mai multe ori) acest procedeu putem să construim întreaga orbită a planetei, fără a recurge la alte date de observație. Acesta este, în principiu, procedeul folosit de mecanică pentru a prevedea traiectoria unui corp în mișcare, numai că metoda folosită aici este puțin practică. Un astfel de procedeu de înaintare, pas cu pas, s-ar dovedi a fi nu numai extrem de anevoios, dar și neexact. Din fericire el este cu totul de prisos ; matematica ne oferă un drum mai scurt și permite o descriere precisă a mișcării, cu mult mai puțină cerneală decît ne trebuie pentru a scrie o singură frază. Concluziile la care ajungem, în acest mod, pot fi confirmate sau desmințite de observații.

Același tip de forță exterioară se găsește în căderea unei pietre și în mișcarea Lunii pe orbita sa, anume atracția exercitată de Pămînt asupra tuturor corpurilor materiale. Newton a recunoscut că mișcarea pietrei în cădere, a Lunii, și a planetelor sînt numai manifestări foarte particulare ale forței de atracție universală, care se exercită între două corpuri. În cazurile simple, mișcarea poate fi descrisă și prezisă cu ajutorul matematicii. În cazuri mai puțin curente și în cele extrem de complicate în care intră în joc acțiunile reciproce ale mai multor corpuri, descrierea matematică nu mai este așa de simplă, dar principiile de bază folosite sînt aceleași.

Concluziile la care am ajuns, urmînd primele noastre idei conducătoare, sînt verificate în mișcarea pietrei aruncată în aer, în mișcarea Lunii, a Pămîntului și a planetelor.

Întregul nostru sistem de ipoteze trebuie să fie confirmat sau infirmat, în întregime, de experiență. Nici una din presupuneri nu poate fi izolată din ansamblu și examinată separat. În cazul rotației planetelor în jurul Soarelui, sistemul nostru mecanic se verifică strălucit. Totuși, putem să ne imaginăm și un alt sistem, bazat pe ipoteze diferite, ce ar fi fost tot atît de eficient.

Noțiunile fizice sînt creații libere ale minții omenești și nu sînt univoc determinate, așa cum s-ar putea crede, de lumea exterioară. În străduințele noastre de a pricepe realitatea, semănăm cu un om care încearcă să înțeleagă mecanismul unui ceas de buzunar închis. El vede cadranul și arătătoarele în mișcare, aude tic-tacul ceasului, dar nu are nici o posibilitate să deschidă capacul. Dacă este ingenios, își va face o imagine oarecare a mecanismului, pe care o va face responsabilă de tot ce observă, dar nu va fi niciodată sigur, că imaginea sa este singura capabilă să explice obsevațiile sale. El nu va fi niciodată în stare să compare mecanismul ipotetic cu cel real și nici măcar nu poate să-și reprezinte posibilitatea sau semnificația unei asemenea comparații. El crede, cu siguranță, că pe măsură ce cunoștințele sale vor crește, imaginea sa despre realitate se va simplifica tot mai mult și va putea explica domenii din ce în ce mai largi de impresii ale simțurilor sale. Poate că este convins și de existența unei limite ideale a cunoașterii pe care o poate atinge mintea omenească. El va putea numi această limită, adevărul obiectiv.

§ 5. ÎNCĂ O IDEE CONDUCĂTOARE

Cînd începem studiul mecanicii, avem impresia că în această ramură totul este simplu, fundamental și definitiv elucidat. Cu greu i-ar trece cuiva prin minte că a mai rămas o cale importantă neobservată de nimeni timp de trei secole. Această cale neglijată este legată de una din noțiunile fundamentale ale mecanicii și anume de *masă*.

Să reluăm experiența noastră idealizată, simplă, cu căruciorul care se mișcă pe un drum perfect neted. Căruciorul, inițial în repaus, primind un impuls, se va mișca uniform, cu o viteză anumită. Să presupunem că acțiunea forței poate fi repetată de cîte ori dorim, astfel ca mecanismul care imprimă impulsuri să acționeze de fiecare dată în același mod, exercitînd aceeași forță asupra aceluiași cărucior. Ori de cîte ori s-ar repeta experiența, viteza dobîndită va fi aceeași. Ce s-ar întîmpla însă dacă am modifica experiența, căruciorul fiind la început gol

și apoi încărcat ? Căruciorul încărcat va avea o viteză finală mai mică decît cel gol. De aici rezultă că dacă asupra a două corpuri diferite, aflate inițial în repaus, acționează aceeași forță, după încetarea ei cele două corpuri nu vor avea aceeași viteză. Spunem că viteza depinde de masa corpului și, anume, este cu atît mai mică cu cît masa este mai mare.

Știm deci, cel puțin în teorie, cum să determinăm, masa unui corp sau mai exact, să stabilim de cîte ori este mai mare o masă decît alta. N-avem decît să supunem cele două mase de comparat, inițial în repaus, acțiunii unor forțe identice. Dacă găsim, de exemplu, că prima capătă o viteză de trei ori mai mare decît a doua, deducem că prima masă este de trei ori mai mică decît cealaltă. Bineînțeles că acesta nu este un procedeu tocmai practic de a determina raportul a două mase. Nu este însă mai puțin adevărat că masa poate fi determinată prin procedeul acesta sau prin altul analog, bazat tot pe aplicarea legii inerției.

Cum determinăm însă în practică masa ? Se înțelege că nu în modul descris mai sus. Răspunsul corect îl poate da oricine : o determinăm prin cîntărire, cu ajutorul balanței.

Să examinăm puțin mai de aproape cele două metode deosebite de determinare a masei.

Prima experiență nu are nimic de aface cu gravitația, cu atracția Pămîntului. Căruciorul se mișcă pe un plan orizontal perfect neted, sub acțiunea impulsului primit. Forța gravitațională care menține căruciorul în contact cu planul, nu variază și, prin urmare, nu trebuie luată în considerare la determinarea masei. La cîntărire însă, situația este cu totul alta. Balanța nici nu ar putea fi concepută dacă Pămîntul nu ar atrage corpurile, dacă nu ar exista gravitația. Deosebirea dintre cele două procedee de determinare a masei, consistă în faptul că pe cînd primul nu are nimic de a face cu gravitația, cel de al doilea se bazează esențial pe existența ei.

Ne întrebăm acum : dacă determinăm raportul dintre două mase prin cele două metode descrise mai sus, găsim același rezultat ? Experiența ne dă un răspuns categoric :

amîndouă procedeele dau același rezultat. Concluzia aceasta nu putea fi însă prevăzută ; ea se bazează pe observație, nu pe rațiune. Să numim, pentru simplicitate, *masă inertă* masa determinată cu ajutorul primului procedeu și *masă gravifică* pe cea determinată cu procedeul al doilea. Se constată că în Universul nostru cele două mase sînt egale, dar ne putem închipui că ele ar fi putut să fie diferite. Numaidecît se naște o nouă întrebare : această egalitate este accidentală sau trebuie să i se atribuie o semnificație mai adîncă ? Răspunsul, din punctul de vedere a fizicii clasice, este : egalitatea celor două mase este accidentală și nu trebuie să-i atribuim o semnificație mai adîncă. Răspunsul fizicii moderne este exact contrariu : egalitatea celor două feluri de mase este fundamentală și ea constituie un fir conducător nou și important, care duce la o înțelegere mai adîncă a fenomenelor. Aceasta a fost, de fapt, una dintre cele mai importante idei pe baza căreia s-a dezvoltat așa-numita teorie a relativității generale.

Un roman polițist este de calitate inferioară dacă explică evenimentele stranii drept întîmplătoare. Simțim desigur mai multă satisfacție dacă acțiunea se desfășoară după o schemă rațională. Tot astfel și o teorie care oferă o explicație pentru egalitatea dintre masa gravifică și cea inertă este superioară unei teorii care interpretează această identitate ca fiind accidentală, bineînțeles, dacă ambele teorii concordă în aceeași măsură cu faptele observate.

Întrucît egalitatea dintre masa inertă și cea gravifică a avut un rol fundamental în formularea teoriei relativității, sîntem îndreptățiți să o examinăm ceva mai îndeaproape. Care sînt faptele experimentale care dovedesc în mod incontestabil că cele două mase sînt egale ? Răspunsul se află în vechile experiențe ale lui Galileu, cînd a lăsat să cadă dintr-un turn corpuri de mase diferite. El a constatat că timpul de cădere este întotdeauna același, cu alte cuvinte, că mișcarea unui corp în cădere este independentă de masa lui.

Pentru a stabili însă corelația dintre acest rezultat experimental simplu, dar foarte important, și egalitatea

celor două feluri de masă, este nevoie de un raţionament destul de complicat.

Sub acţiunea unei forţe exterioare, un corp în repaus se pune în mişcare şi atinge o viteză anumită. El se urneşte mai uşor sau mai greu, în funcţie de masa lui inertă ; cu cît această masă este mai mare, cu atît corpul se opune mai puternic tendinţei de a-l pune în mişcare. Putem spune, fără a avea pretenţii de rigurozitate, că promptitudinea cu care un corp răspunde la acţiunea unei forţe exterioare depinde de masa sa inertă. Dacă ar fi just că Pămîntul atrage toate corpurile cu aceeaşi forţă, atunci corpul cu masa inertă cea mai mare ar cădea mai încet decît toate celelalte. Acesta nu este cazul : toate corpurile cad la fel de repede. De aici rezultă că forţa cu care Pămîntul atrage mase diferite este diferită. Dar Pămîntul atrage o piatră cu forţa greutăţii şi nu ştie nimic de masa ei inertă. Forţa cu care Pămîntul „cheamă" piatra depinde de masa ei gravifică. Dimpotrivă, mişcarea prin care ea „răspunde" acestei chemări depinde numai de masa ei inertă. Dat fiind că mişcarea de „răspuns" este totdeauna aceeaşi, toate corpurile lăsate să cadă de la aceeaşi înălţime cad la fel, trebuie să deducem că masa gravifică şi masa inertă sînt egale.

Fizicianul formulează acest adevăr ceva mai pedant : acceleraţia unui corp în cădere liberă creşte proporţional cu masa lui grea şi se micşorează proporţional cu masa lui inertă. Întrucît toate corpurile în cădere liberă au una şi aceeaşi acceleraţie, cele două mase trebuie să fie egale.

În povestirea noastră despre marile taine ale naturii, nu există probleme pe deplin rezolvate şi definitiv închise. După 300 de ani am fost puşi în situaţia de a ne întoarce la problema iniţială a mişcării şi de a revizui procedeul de investigaţie, pentru a găsi noţiuni trecute cu vederea odinioară, făurindu-ne astfel o nouă imagine a Universului.

§ 6. ESTE CĂLDURA O SUBSTANŢĂ ?

Să pornim acum pe o nouă cale cu punctul de plecare în domeniul fenomenelor calorice. Fără discuţie, este imposibil să descompunem ştiinţele naturii în domenii dispa-

rate fără legături între ele. În adevăr, vom vedea îndată că noțiunile noi introduse aici se împletesc cu cele familiare precum și cu cele pe care le vom mai întîlni. O linie de gîndire dezvoltată într-o anumită ramură a științei poate fi deseori folosită la descrierea unor fenomene, care, în aparență, au un caracter cu totul diferit.

În acest proces, noțiunile primitive se modifică deseori astfel încît să înlesnească atît înțelegerea fenomenelor din care au derivat, cît și a celor cărora urmează să le fie aplicate.

Noțiunile cele mai importante necesare pentru descrierea fenomenelor calorice sînt *temperatura* și *căldura*. A durat neînchipuit de mult pînă cînd știința a stabilit distincția dintre aceste două noțiuni, dar o dată făcută această distincție, au rezultat progrese rapide. Deși aceste noțiuni sînt astăzi familiare oricui, le vom examina mai îndeaproape, subliniind mai cu seamă deosebirile dintre ele.

Simțul nostru tactil ne spune clar că cutare corp este cald și cutare corp este rece. Dar acesta este un criteriu pur calitativ, insuficient pentru o descriere cantitativă și care uneori este chiar ambiguu. Putem arăta aceasta cu ajutorul unei experiențe bine cunoscute : să considerăm trei vase, conținînd respectiv, apă rece, apă caldă și apă fierbinte. Introducînd o mînă în apa rece și pe cealaltă în apa fierbinte, vom primi o indicație de la prima mînă că este rece și de la cea de a doua că este fierbinte. Introducînd apoi ambele mîini, în același timp, în apa caldă, cele două mîini ne vor transmite senzații contradictorii. Tot din aceeași cauză, un eschimos și un locuitor al zonei ecuatoriale, cari s-ar întîlni într-o zi de primăvară la New York, n-ar putea cădea de acord dacă vremea este caldă sau rece. Toate problemele de acest fel le rezolvăm cu ajutorul termometrului, un instrument pe care l-a construit mai întîi Galileu într-o formă primitivă. Din nou acest nume bine cunoscut ! Utilizarea termometrului se bazează pe unele presupuneri fizice evidente. Le vom aminti citind cîteva rînduri din prelegerile ținute acum vreo 150 de ani de către Black, prelegeri cari au contri-

buit foarte mult la înlăturarea dificultăţilor ivite în legătură cu noţunile de căldură şi temperatură :

„Servindu-ne de acest instrument am învăţat că, dacă luăm 1 000 sau mai multe feluri (diferite) de materie, ca metale, pietre săruri, lemn, pene, lînă, apă şi diverse alte fluide, care posedă *călduri* diferite, şi le aşezăm în aceeaşi cameră neîncălzită şi în care nu pătrunde Soarele, cele mai calde dintre aceste corpuri vor transmite căldura lor corpurilor celor mai reci, în cîteva ore, poate într-o zi; dacă după acest timp vom aplica termometrul fiecărui corp succesiv, el va arăta exact acelaşi număr de grade".

Cuvîntul tipărit cursiv „*călduri*" va trebui înlocuit, după terminologia de azi, prin cuvîntul *temperaturi*.

Un medic care scoate termometrul din gura unui bolnav ar putea raţiona astfel : „Termometrul indică temperatura sa proprie prin lungimea coloanei de mercur. Presupunem că lungimea coloanei de mercur este proporţională cu temperatura. Dar termometrul a stat cîteva minute în contact cu pacientul meu, astfel încît pacientul şi termometrul au aceeaşi temperatură. Conchid că temperatura pacientului meu este identică cu cea indicată de termometru". Probabil că medicul procedează mecanic, totuşi aplică principii fizice fără a fi conştient de aceasta.

Conţine termometrul însă aceeaşi cantitate de căldură ca şi corpul bolnavului ? Desigur că nu. A presupune că două corpuri conţin cantităţi de căldură egale numai pentru faptul că au temperaturi egale, ar însemna, după cum observă Black :

„..., o tratare prea pripită a chestiunii. Aceasta ar însemna să confundăm cantitatea de căldură conţinută în diferite corpuri cu tăria sau intensitatea ei generală, cu toate că, vădit, este vorba despre două lucruri cu totul diferite, care trebuie deosebite ori de cîte ori avem de a face cu distribuţia căldurii".

Înţelegem această deosebire cu ajutorul unei experienţe foarte simple. Unui litru de apă încălzit la o flacără de gaz, îi trebuie un timp anumit pentru a trece de la temperatura camerei la punctul de fierbere. Fireşte că ar dura mult mai mult să încălzim 12 litri de apă în acelaşi vas şi la aceeaşi flacără. Interpretăm acest fapt spunînd că în cazul al doilea este nevoie de o cantitate mai mare dintr-un anume lucru şi acest „ceva" îl numim : *căldură*.

O altă noțiune importantă și anume cea de *căldură specifică*, poate fi dobîndită din experiența următoare : două vase, unul conținînd 1 kg de apă, celălalt 1 kg de mercur, sînt încălzite amîndouă la fel. Se constată că mercurul se încălzește mult mai repede decît apa, și rezultă că are nevoie de mai puțină „căldură" decît apa pentru a-și ridica temperatura cu un grad. În general sînt diferite cantitățile de căldură necesare pentru a ridica cu un grad, să spunem de la 10° pînă la 11°C, temperatura unor mase egale din substanțe diferite, ca mercurul, fierul, cuprul, lemnul etc. Spunem că fiecare substanță are *căldura sa specifică.*

O dată ce am cîștigat noțiunea de „căldură" putem să cercetăm mai de aproape natura sa. Să luăm două corpuri : unul cald și altul rece, sau mai precis, unul avînd temperatura mai ridicată decît celălalt ; dacă le punem în contact și eliminăm toate influențele exterioare, constatăm, după cum știm, că în cele din urmă ele ajung la aceeași temperatură. Cum se produce aceasta ? Ce se petrece între momentul cînd corpurile sînt puse în contact și momentul cînd temperaturile au ajuns egale ? Imaginea „curgerii" căldurii de la un corp la celălalt, asemenea curgerii apei de la un nivel mai înalt către un nivel mai jos, se impune singură. Această imagine, primitivă, pare a fi compatibilă cu multe fapte, astfel încît se poate stabili următoarea analogie :

apă — căldură
nivel superior — temperatură mai înaltă
nivel inferior — temperatură mai joasă.

Curgerea continuă pînă cînd cele două nivele, adică cele două temperaturi, devin egale. Această imagine naivă poate deveni mai utilă prin considerații cantitative. Dacă se amestecă cantități determinate de apă și alcool avînd temperaturi bine definite, dacă se cunosc căldurile specifice ale ambelor substanțe, se poate prezice temperatura finală a amestecului. Reciproc, măsurarea temperaturii finale împreună cu puțină algebră, ne dă posibilitatea de a găsi raportul căldurilor specifice ale celor două substanțe.

Recunoaștem în noțiunea de căldură, așa cum a fost

introdusă aici, o asemănare cu alte noțiuni fizice. Potrivit concepției noastre, căldura este o substanță întocmai ca masa în mecanică. Cantitatea de căldură poate varia sau nu ca și banii care pot fi cheltuiți sau încuiați într-o casă de bani. Suma închisă într-o casă de bani, rămîne intactă cîtă vreme casa de bani este încuiată ; același lucru se întîmplă cu masa sau cantitatea de căldură a unui corp izolat. Analogul unei astfel de case de bani ar fi un termos ideal. Mai constatăm că, după cum masa unui sistem izolat rămîne neschimbată chiar dacă el este sediul unor transformări chimice, tot astfel și căldura se conservă chiar atunci cînd curge de la un corp la altul. Chiar dacă nu este folosită căldura la ridicarea temperaturii, ci, de exemplu, la topirea gheții sau evaporarea apei, putem totuși considera căldura ca o substanță, întrucît ea poate fi recuperată prin înghețarea apei, respectiv prin lichefierea vaporilor. Vechii termeni de căldură latentă de topire sau de evaporare, arată că ele sînt scoase din concepția căldurii ca substanță. Căldura latentă este ascunsă temporar, asemenea banilor păstrați în casa de bani, dar ca și ei este oricînd la dispozița noastră, de îndată ce cunoaștem secretul broaștei.

Dar, cu siguranță, căldura nu este o substanță în același sens ca masa. Masa poate fi pusă în evidență cu ajutorul balanței ; se poate oare face același lucru cu căldura ? Cîntărește o bucată de fier mai mult cînd este încălzită la roșu decît cînd este rece ca gheața ? Experiența arată că nu. Dacă căldura este o substanță, atunci ea trebuie să fie fără greutate. Substanța-calorică era denumită *caloric* și este prima noastră cunoștință despre o întreagă familie de substanțe fără greutate. În cele ce urmează vom avea prilejul să urmărim istoria acestei familii, înflorirea și decăderea ei. Deocamdată ne mulțumim să luăm act de nașterea acestui prim membru al ei.

Ținta oricărei teorii fizice este de a interpreta un cerc cît mai larg de fenomene. Ea se justifică în măsura în care face inteligibile anumite evenimente. Am văzut că teoria „căldurii-substanță" explică multe fenomene calorice. Dar, în curînd vom constata că am apucat din nou pe o cale greșită, căci căldura nu poate fi privită ca o substanță,

fie ea chiar fără greutate. Vom înțelege lesne aceasta dacă ne vom referi la unele experiențe care au marcat începuturile civilizației.

Concepem substanța ca ceva care nu poate fi nici creat, nici distrus. Totuși, omul primitiv a produs prin frecare suficientă căldură pentru a aprinde lemnul. Exemplele de producere a căldurii prin frecare sînt mult prea numeroase și binecunoscute, pentru a mai fi nevoie să le mai cităm. În toate aceste cazuri este creată o anumită cantitate de căldură, fapt greu de explicat prin teoria căldurii-substanță. Bineînțeles că un adept al acestei teorii ar putea să inventeze argumente în favoarea acestei teorii. Raționamentul lui ar fi cam astfel : „Teoria substanței poate explica crearea aparentă de căldură. Să luăm exemplul cel mai simplu : frecăm una de alta două bucăți de lemn; frecarea influențează lemnul schimbîndu-i proprietățile. Este foarte probabil ca modificarea să se facă astfel încît o cantitate de căldură neschimbată să producă o temperatură mai ridicată decît înainte. În definitiv singurul lucru pe care-l constatăm este ridicarea temperaturii. Prin urmare, s-ar putea admite că frecarea a schimbat numai căldura specifică a lemnului, nu și cantitatea totală de căldură".

În această fază a discuției ar fi fără rost să argumentăm contra susținătorului teoriei substanței, căci problema nu poate fi lămurită decît prin experiență. Să ne închipuim două bucăți de lemn identice și să presupunem că le-am produs variații de temperatură egale, prin metode diferite : uneia prin frecare, celeilalte prin contactul cu un radiator. Dacă cele două bucăți de lemn identice ar avea aceeași căldură specifică și la noua temperatură, atunci întreaga teorie a substanței s-ar prăbuși. Există metode foarte simple pentru determinarea căldurii specifice, iar soarta teoriei depinde tocmai de rezultatul acestor măsurări.

Probele capabile să decidă asupra vieții sau morții unei teorii se întîlnesc adesea în istoria fizicii și sînt numite experiențe *cruciale*. Valoarea crucială a unei experiențe se relevă numai prin modul cum este formulată chestiunea, și numai o singură teorie poate fi verificată

de ea. Determinarea căldurii specifice a două corpuri de același fel, aduse la aceeași temperatură, unul prin frecare, celălalt prin flux de căldură, este un exemplu tipic de experiență crucială. Ea a fost efectuată acum vreo 150 de ani de către Rumford și a dat lovitura de grație teoriei „căldurii-substanță".

Dăm mai jos un extras din expunerea lui Rumford însuși, în care se descrie mersul experienței :

„Se întîmplă deseori că în cursul treburilor și ocupațiilor curente să ni se ofere, de la sine, ocazii favorabile de a contempla operații dintre cele mai curioase ale naturii; experiențe fizice foarte interesante pot fi adesea efectuate fără dificultate și cheltuială cu ajutorul mașinilor inventate pentru simpla satisfacere a nevoilor industriei.

Am avut deseori ocazia să fac această observație și am ajuns la convingerea că obiceiul de a păstra ochii deschiși la tot ceea ce se întîmplă în viața de toate zilele, conduce adesea, ca din întîmplare, sau prin jocul neastîmpărat al fanteziei pusă în acțiune de observarea fenomenelor celor mai banale, la îndoieli folositoare și proiecte judicioase de cercetare și îmbunătățire, mai repede ca meditațiile cele mai intense ale filosofilor în metalice desprinse de burghiu.

Trebuind, în ultima vreme, să supraveghez fabricarea țevilor de tun în atelierele arsenalului militar din München, am fost izbit de considerabilul grad de căldură dobîndit în scurt timp de un tun de alamă, cînd era găurit, și de căldura (mult mai mare decît a apei care fierbe, cum am stabilit experimental) strunjiturii metalice desprinse de burghiu.

De unde provine căldura produsă prin operația mecanică menționată mai sus ?

Este ea oare furnizată de către strunjitura desprinsă de burghiu din masa solidă a metalului ?

Dacă ar fi așa, atunci potrivit teoriilor moderne despre căldura latentă și despre caloric, nu numai că s-ar fi schimbat căldura specifică a strunjiturii, dar această schimbare ar fi trebuit chiar să fie atît de mare încît să justifice toată căldura produsă.

Or, nici o astfel de schimbare nu s-a produs căci luînd cantități de greutate egală de strunjitură și de bucăți mici din același bloc de metal, tăiate cu un ferăstrău fin, și aducîndu-le la aceeași temperatură (a apei care fierbe) și introducîndu-le în cantități egale de apă rece (a cărei temperatură era de $59\frac{1}{2}$°F[1]), apa în care fusese aruncată strunjitura, după toate aparențele, nu s-a încălzit nici mai mult nici mai puțin decît apa în care au fost puse bucățile de metal.

[1]) Adică 15,3°C. N. Red. E. T.

Iată concluzia lui finală :

Reflectînd asupra acestei chestiuni, nu avem voie să uităm împrejurarea extrem de remarcabilă că izvorul căldurii născute prin frecare, în aceste experiențe, s-a dovedit, în mod manifest, a fi *inepuizabil.*

Aproape că este de prisos să adăugăm că ceea ce un corp *izolat* sau un sistem de corpuri izolate poate furniza ***nelimitat*** nu poate fi niciodată ***o substanță materială;*** și exceptînd ***mișcarea,*** mi se pare extrem de greu, pentru a nu spune complet imposibil, să ne facem o imagine clară despre ceva ce poate fi generat și transmis în felul în care a fost generată și transmisă căldura în aceste experiențe".

Vedem astfel că vechea teorie se prăbușește sau mai exact vedem că teoria „căldurii-substanță" trebuie să fie limitată numai la problemele fluxului de căldură. Iarăși, după cum ne-a sugerat Rumford, trebuie căutată o nouă idee conducătoare. Pentru aceasta vom lăsa deocamdată în suspensie problema căldurii și ne vom întoarce la mecanică.

§ 7. MONTAGNES RUSSES

Să urmărim acum puțin mișcarea vagonetului pe montagnes-ii russes, acest popular izvor de senzații tari. Este vorba de un mic vagonet, ridicat sau tras pînă la punctul cel mai înalt al traseului. Lăsat liber, el lunecă întîi la vale o bucată, sub acțiunea forței de gravitație, apoi începe să se urce și să coboare o pantă șerpuită în modul cel mai capricios, dînd celor instalați în el, fiorul variației bruște de viteză. Punctul cel mai înalt al traseului este locul de pornire. În tot cursul mișcării, vagonetul nu mai atinge niciodată această înălțime (fig. 20). O descriere completă a acestei mișcări ar fi foarte complicată. Pe de o parte ar trebui considerată latura mecanică a problemei, variațiile în timp ale vitezei și poziției. Pe de altă parte, frecarea și deci producerea căldurii în șine și roți. Singura justificare valabilă a descompunerii fenomenului fizic în aceste două aspecte este posibilitatea de a face uz de noțiunile tratate anterior. Descompunerea aceasta conduce din nou la o experiență idealizată, căci un feno-

men fizic, în cursul căruia să apară numai aspectul mecanic, poate fi imaginat, nu însă şi realizat.

Pentru experienţa idealizată, ne putem imagina pe cineva care a ajuns să elimine complet frecarea care în-

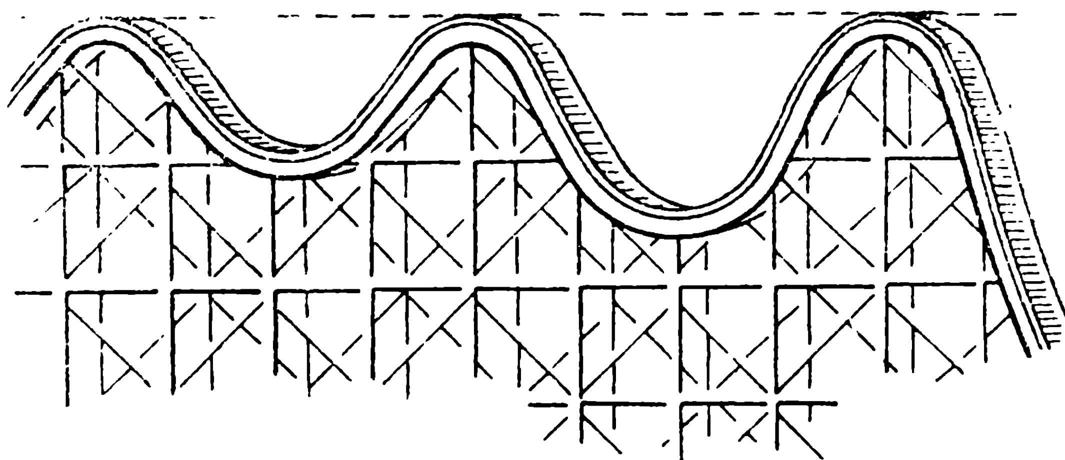


Fig. 19.

soţeşte totdeauna mişcarea. El se hotărăşte să aplice descoperirea sa la construirea de montagnes russes şi să caute singur mijlocul de realizare. Vagonetul care, în punctul de plecare, se află la înălţimea de 30 m deasupra

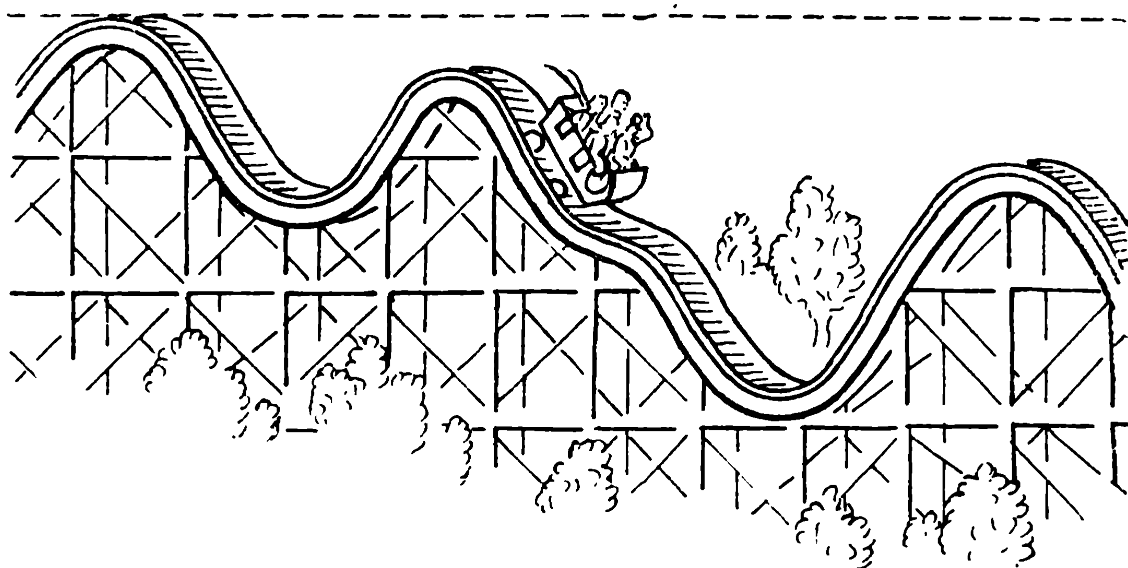


Fig. 20.

Pămîntului trebuie să urce şi să coboare. După cîteva încercări, el găseşte o regulă simplă de urmat : este liber să aşeze şinele oricum, cu condiţia ca nici un punct să nu întreacă înălţimea punctului de plecare (fig. 19). Dacă vagonetul va merge liber pînă la căpătul cursei, el va putea atinge, ori de cîte ori, înălţimea de 30 m, dar nu o va

putea depăși niciodată. Înălțimea inițială nu va fi atinsă niciodată pe o cale ferată reală, din cauza frecării ; dar inginerul nostru ipotetic nu trebuie să țină seama de acest lucru.

Să urmărim acum mișcarea vagonetului idealizat pe montagnes-ii russes în condiții ideale, începînd din momentul cînd coboară din punctul cel mai înalt. Pe măsură ce înaintează, înălțimea sa deasupra solului scade, dar viteza sa crește. Afirmația aceasta ne amintește, la prima vedere, o frază întîlnită în exercițiile de traducere : „eu nu am creion, dar tu ai șase portocale". Ea nu este însă chiar atît de stupidă. Între împrejurarea că eu nu am creion și faptul că altcineva are șase portocale nu este nici o legătură dar, între înălțimea vehiculului deasupra solului și viteza lui există o corelație foarte reală. Putem chiar să calculăm în fiecare moment viteza vagonetului, dacă știm la ce înălțime, se află deasupra solului ; vom trece însă peste această chestiune, deoarece ea are un caracter cantitativ, care poate fi exprimat cel mai bine prin formule matematice.

În punctul cel mai înalt al traiectoriei sale, adică la 30 m de la sol, viteza vagonetului este egală cu zero. În punctul cel mai de jos el este la nivelul solului și are viteza cea mai mare. Aceste fapte pot fi exprimate și altfel : în punctul cel mai înalt al traiectoriei sale, vagonetul are *energie potențială,* dar nu are *energie cinetică* sau energie de mișcare. În punctul cel mai jos, el are energia cinetică cea mai mare, dar nici o energie potențială. În toate pozițiile intermediare, unde fiecărei înălțimi îi corespunde și o viteză, vagonetul are atît energie cinetică, cît și energie potențială. Energia potențială crește cu înălțimea, în timp ce energia cinetică crește pe măsură ce crește viteza. Principiile mecanicii sînt suficiente pentru a explica această mișcare. În descrierea matematică apar două expresii pentru energie, amîndouă variabile, dar a căror sumă rămîne constantă. Astfel se pot introduce, riguros (matematic), pe de o parte noțiunea de energie potențială care depinde de poziție, iar pe de altă parte cea de energie cinetică care este funcție de viteză. Introducerea acestor doi termeni este de fapt arbitrară și nu se justifică decît prin considerații de comoditate. Suma ce-

lor două mărimi rămîne neschimbată și reprezintă o constantă a mișcării. Energia totală, cea cinetică plus cea potențială, poate fi comparată de exemplu cu niște bani, a căror sumă rămîne intactă, pe care-i preschimbăm însă la un curs bine stabilit dintr-o valută în alta, de exemplu, din dolari în lire sterline și invers.

În condițiile reale, în care frecarea împiedică vagonetul să mai atingă o înălțime egală cu cea de la care a plecat, are loc de asemenea o trecere necontenită a energiei cinetice în cea potențială și invers. Aici însă suma lor nu rămîne constantă, ci scade. Este necesar acum să facem un nou pas important și îndrăzneț pentru a stabili corelația dintre aspectele mecanice și cele calorice ale mișcării. Bogăția de consecințe și generalizări după acest pas, o vom vedea mai tîrziu.

Este acum implicată în mișcare, pe lîngă energia cinetică și energia potențială, și căldura produsă prin frecare. Corespunde această căldură descreșterii energiei mecanice, adică celei cinetice sau celei potențiale ? Se impune o nouă ipoteză : Dacă vom considera căldura ca o formă a energiei, poate că suma celor trei energii : căldură, energie cinetică și potențială, rămîne constantă. Cu alte cuvinte, nu căldura singură, ci căldura împreună cu alte forme de energie ar fi indestructibilă, asemenea unei substanțe. Adică, lucrurile s-ar petrece ca și cum un om ar trebui să-și plătească lui însuși un comision în franci pentru schimbarea dolarilor în lire sterline și ar economisi această sumă, astfel, încît suma dolarilor, lirelor și francilor să constituie un total fix conform cu un anumit curs al valcrilor.

Progresul științific a distrus vechiul concept de căldură ca substanță. În locul ei, să încercăm a introduce o nouă substanță, energia, căldura fiind numai o formă a ei.

§ 8. RAPORTUL DE TRANSFORMARE

Mai puțin cu o sută de ani în urmă, noua descoperire care a condus la conceptul de căldură ca formă a energiei a fost indicată de Mayer și confirmată experimental

de Joule. Este o stranie coincidență că aproape toate cercetările fundamentale privitoare la natura căldurii au fost făcute de către fizicieni neprofesioniști care considerau fizica numai ca o distracție preferată. Aceștia au fost: multilateralul scoțian Black, medicul german Mayer și marele aventurier american, contele de Rumford care mai tîrziu a trăit în Europa și, între altele, a ocupat postul de ministru de război al Bavariei. Să nu-l uităm și pe fabricantul de bere, englezul Joule, care în timpul său liber a făcut experiențe dintre cele mai importante privitoare la conservarea energiei.

Joule a verificat, prin experiență, ipoteza potrivit căreia căldura este o formă a energiei și a determinat raportul de transformare. Merită să ne ocupăm puțin de rezultatele la care a ajuns el.

Energia cinetică și energia potențială ale unui sistem, la un loc, constituie energia lui *mecanică*. Cînd am vorbit despre montagnes-ii russes am făcut ipoteza că o parte din energia mecanică s-ar transforma în căldură. Dacă ar fi așa, atunci nu numai pentru acest proces ci și pentru toate procesele fizice asemănătoare, ar trebui să existe un *raport de transformare* bine definit, un curs bine stabilit la care să se facă transformarea energiei mecanice în căldură. Aceasta este o chestiune cantitativă, dar faptul că o cantitate dată de energie mecanică se poate transforma într-o cantitate anumită de căldură este de importanță capitală. Voim să știm care este numărul ce exprimă raportul de transformare, cu alte cuvinte cantitatea de căldură ce se poate obține dintr-o cantitate dată de energie mecanică.

Determinarea acestui număr a făcut obiectul cercetărilor lui Joule. Dispozitivul de care s-a folosit în una din experiențele sale se aseamănă foarte mult cu o pendulă (fig. 21). O astfel de pendulă se remontează prin ridicarea a două greutăți, comunicîndu-se astfel energie potențială sistemului. Dacă nu mai intervenim apoi în mecanismul ceasului, el poate fi considerat un sistem închis. Greutățile coboară lent și ceasul merge. După un timp anumit, greutățile vor atinge poziția lor cea mai de jos și ceasul se va opri. Ce s-a întîmplat cu energia?

Energia potențială a greutăților s-a transformat în energia cinetică a mecanismului, risipindu-se apoi treptat sub formă de căldură.

O modificare convenabilă a unui astfel de mecanism a permis lui Joule să măsoare căldura pierdută și să determine astfel raportul de transformare. La aparatul său

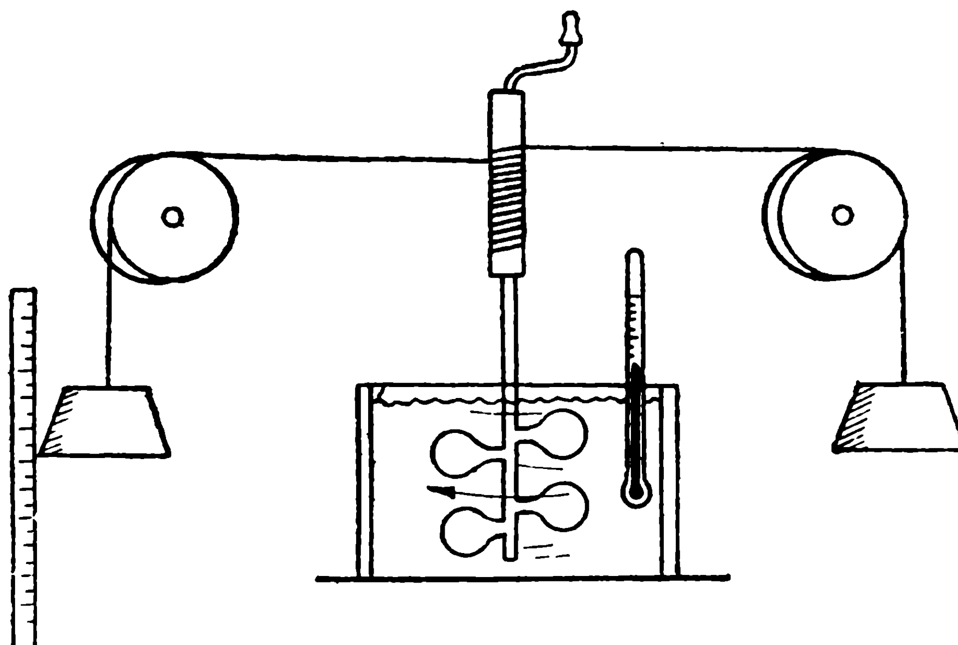


Fig. 21

două greutăți făceau să se rotească o roată cu palete cufundate în apă. Energia potențială a greutăților era transformată în energia cinetică a părților mobile ale aparatului, apoi în căldură, care ridica temperatura apei. Joule măsura variația de temperatură și apoi, pe baza căldurii specifice cunoscute a apei, calcula cantitatea de căldură absorbită. Rezultatele numeroaselor sale experiențe le-a rezumat după cum urmează :

1. Cantitatea de căldură produsă prin frecarea corpurilor solide sau lichide este întotdeauna proporțională cu cantitatea de forță cheltuită (prin forță, Joule înțelegea energie).

2. Cantitatea de căldură capabilă să ridice cu 1° Fahrenheit (0,56°C) temperatura unei livre engleze de apă (cîntărită în vid și luată între 55°—60° Fahrenheit adică între 13° și 16°C) necesită pentru producerea sa cheltuirea unei forțe mecanice (a unei energii) reprezentată de căderea a 772 livre engleze (≈ 350 kg) pe distanța de un picior (30,48 cm).

Cu alte cuvinte: energia potențială a 772 livre, ridicate la înălțimea de un picior de la Pămînt, ar fi echivalentă cu cantitatea de căldură necesară pentru a încălzi o livră de apă de la 55° pînă le 56° Fahrenheit. Experimentatorii care au urmat au fost capabili să atingă o precizie mai mare, dar echivalentul mecanic al căldurii este, în esență, cel stabilit de către Joule în opera sa de pionier.

O dată realizată această importantă operă, progresul a fost deosebit de rapid. S-a recunoscut curînd că energia mecanică și cea calorică reprezintă numai două din multele forme pe care le poate lua energia. Tot ce se poate transforma în una din aceste două forme de energie este de asemenea o formă a energiei. Astfel, radiația emisă de Soare este energie deoarece ea se transformă, parțial, în căldură pe Pămînt. Un curent electric are energie căci el încălzește un fir metalic sau face să se învîrtească roțile unui motor. Cărbunele conține energie chimică ce poate fi pusă în libertate, prin ardere, sub formă de căldură. În toate fenomenele din natură, energia se transformă dintr-o formă în alta și anume totdeauna potrivit unui raport de transformare bine definit. Intr-un sistem închis, adică ferit de orice influență exterioară, energia se conservă, comportîndu-se astfel ca și o substanță. Suma tuturor formelor de energie posibile, care ar interveni într-un astfel de sistem, este constantă, chiar dacă fiecare specie de energie, în parte, ar varia cantitativ. Privind întregul Univers ca un singur sistem închis, putem proclama cu mîndrie, alături de fizicienii secolului al XIX-lea, că energia Universului este invariantă, că nici o părticică din ea nu ar putea fi vreodată creată sau distrusă.

Avem acum două concepte de substanță: *materia* și *energia*. Amîndouă se supun legilor de conservare: într-un sistem izolat nu poate varia nici masa și nici energia sa totală. Materia are greutate, energia este imponderabilă. Avem deci două noțiuni diferite și două legi de conservare distincte. Ne mai putem declara astăzi adepții acestor idei? Sau, în lumina progreselor recente, această reprezentare, în aparență bine întemeiată, n-a fost modifi-

cată ? Ei bine, ea a fost modificată ! Transformările ulterioare ale acestor două noțiuni sînt legate de teoria relativității ; asupra acestui punct vom reveni mai tîrziu.

§ 9. CONCEPȚIILE FILOSOFICE

Foarte des rezultatele cercetărilor științifice impun schimbarea punctului de vedere filosofic asupra unor probleme care depășesc cu mult cadrul restrîns al științei însăși. Care este obiectivul științei ? Ce i se pretinde unei teorii care încearcă să descrie natura ? Aceste chestiuni, deși depășesc cadrul fizicii, sînt totuși strîns legate de ea, căci știința procură materialul, din care ele izvorăsc. Generalizările filosofice trebuie să fie bazate pe rezultate științifice. O dată formulate și larg acceptate, ele influențează foarte des, la rîndul lor, evoluția ulterioară a gîndirii științifice, indicînd una din numeroasele direcții de dezvoltare posibile. Revolta încununată de succes împotriva unei concepții dominante are ca rezultat dezvoltări neprevăzute și inedite, care devin o sursă de noi aspecte filosofice. Aceste observații sînt inevitabil vagi și fără conținut, atîta vreme cît nu le ilustrăm cu exemple din istoria fizicii.

Să încercăm acum să expunem primele idei filosofice asupra obiectivelor științei. Aceste idei au continuat să influențeze puternic dezvoltarea fizicii pînă acum aproape 100 de ani, cînd au fost părăsite în virtutea noilor legi și teorii care au alcătuit la rîndul lor un nou cadru pentru știință.

În toată istoria filosofiei, începînd cu filosofia greacă și terminînd cu fizica modernă, s-au remarcat încercările constante de a reduce complexitatea aparentă a fenomenelor naturii la cîteva idei și relații fundamentale simple. Principiul acesta stă la baza oricărei filosofii naturale. El este exprimat încă în opera atomiștilor. Astfel, Democrit scria în urmă cu 23 de secole :

„Prin convenție dulcele este dulce, prin convenție amarul este amar, prin convenție caldul este cald, prin convenție recele este rece, prin convenție culoarea este culoare. Dar în realitate există

atomi și vid. Adică obiectele simțurilor sînt presupuse reale și se obișnuiește să fie privite ca atare, dar ele nu sînt cu adevărat. Numai atomii și vidul sînt reali".

În filosofia antică, această idee nu întrece caracterul unei ficțiuni a imaginației. Legi ale naturii care să stabilească o corelație între evenimentele care se succed erau necunoscute Grecilor. O știință care să lege teoria cu experiența a început cu opera lui Galileu. Pînă acum am urmat primele idei conducătoare, ce au condus la legile mișcării. De-a lungul a două sute de ani de cercetare științifică, forța și materia au fost noțiunile de bază ale oricărei încercări de a înțelege natura. Este cu neputință să ne-o reprezentăm pe una fără cealaltă, întrucît materia își manifestă existența numai ca izvor al unei forțe prin acțiunea ei asupra altei materii.

Să luăm exemplul cel mai simpu: două particule, între care se exercită forțe. Forțele, pe care ni le putem reprezenta cel mai ușor, sînt cele de atracție sau de respingere. În ambele cazuri vectorii forță sînt situați în lungul liniei care unește cele două puncte materiale. Cerința simplicității este cea care conduce la imaginea unor particule care se atrag sau se resping reciproc (fig. 22); orice altă ipoteză, cu privire la direcția forțelor care ar acționa, ar duce la o imagine considerabil mai complicată. Putem oare face o presupunere tot atît de simplă cu privire la lungimea vectorilor forță? Chiar dacă dorim să evităm ipotezele prea particulare, putem totuși adopta presupunerea că forța ce acționează între două particule date depinde, ca și atracția gravitațională, numai de distanța dintre ele. Aceasta este destul de simplu. S-ar putea imagina forțe mult mai complicate, de exemplu forțe care să depindă nu numai de distanța dintre particule, ci și de viteza lor. Cu materia și forța, drept concepte fundamentale, am putea cu greu imagina ipoteze mai simple decît aceea că forța acționează în lungul liniei ce unește cele două particule și depinde numai de distanță. Este

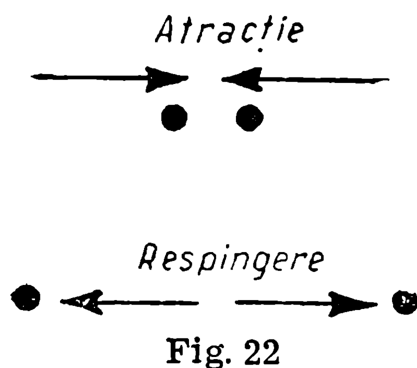


Fig. 22

— într-adevăr — posibil să se descrie toate fenomenele fizice exclusiv cu ajutorul unor forțe de tipul acesta ?

Marile realizări ale mecanicii în toate ramurile ei, succesul răsunător obținut de ea în dezvoltarea astronomiei, aplicarea ideilor ei la probleme net diferite și neavînd un caracter mecanic, au făcut să apară credința că este posibil să se descrie absolut toate fenomenele naturale prin jocul unor forțe simple, care s-ar exercita între obiecte invariabile. De-a lungul a două secole care au urmat perioadei lui Galileu, tendința aceasta conștientă sau inconștientă se manifestă aproape în toate creațiile științifice. Aceasta a fost formulată foarte limpede, către mijlocul secolului al XIX-lea, de Helmholz :

„În sfîrșit descoperim totuși că problema științei fizice consistă în a reduce fenomenele naturale la forțe invariabile de atracție și de repulsie, a căror intensitate depinde de distanță.

Soluția acestei probleme este condiția unei înțelegeri complete a naturii".

Astfel, după Helmholz, linia dezvoltării științei este deci determinată și urmează un curs riguros fix :

„Misiunea ei va fi îndeplinită pe măsură ce reducerea fenomenelor naturii la forțe simple va fi deplină și va face dovada că reducerea aceasta este singura de care sînt capabile fenomenele".

Unui fizician din secolul al XX-lea, concepția aceasta îi apare simplistă și naivă. El s-ar îngrozi la gîndul că marea aventură a cercetărilor s-ar putea curma atît de curînd și că o imagine dezolantă a Universului, deși infailibilă, s-ar putea instaura pentru vecie.

Cu toate că această doctrină ar vrea să reducă descrierea tuturor fenomenelor la forțe simple, totuși ea lasă deschisă problema felului în care forțele ar depinde de distanță. S-ar putea ca această dependență să difere de la fenomen, la fenomen. Dar necesitatea de a introduce multe tipuri diferite de forțe, pentru diferitele fenomene este, fără îndoială, nesatisfăcătoare din punctul de vedere filosofic. Totuși, *concepția mecanicistă*, formulată în modul cel mai categoric de către Helmholz, a jucat la timpul

ei un rol însemnat. Dezvoltarea teoriei cinetice a materiei este una din cuceririle cele mai mari influențată direct de concepția mecanicistă.

Înainte de a asista la declinul concepției mecaniciste să acceptăm provizoriu punctul de vedere al fizicianului din secolul trecut, trăgînd împreună cu el concluziile ce decurg din imaginea sa asupra lumii exterioare.

§ 10. TEORIA CINETICĂ A MATERIEI

Este oare posibilă explicarea fenomenelor calorice ca urmare a mișcării unor particule care acționează una asupra alteia cu forțe simple ? Un vas închis conține o cantitate anumită de gaz, de exemplu aer, la o temperatură determinată. Încălzindu-l îi ridicăm temperatura și-i mărim energia. Cum este legată încălzirea de mișcare ? Posibilitatea unei astfel de legături ne este sugerată atît de punctul nostru de vedere filosofic, acceptat provizoriu, cît și de modul în care se produce căldura prin mișcare. Căldura trebuie să fie o energie mecanică, dacă orice problemă este de natură mecanică. Obiectul *teoriei cinetice* este de a prezenta conceptul de materie tocmai sub acest aspect. Potrivit acestei teorii, un gaz reprezintă o îngrămădire de enorm de multe particule sau *molecule*, care se mișcă în toate direcțiile, ciocnindu-se între ele și schimbîndu-și direcția de mișcare după fiecare ciocnire. Trebuie să existe o viteză medie pentru molecule, după cum într-o mare comunitate de oameni se poate stabili o vîrstă medie sau un avut mediu. Prin urmare, trebuie să existe și o energie cinetică medie pe particulă. Mai multă căldură în vas înseamnă o mai mare energie cinetică medie a particulelor din el. Prin urmare, potrivit acestei imagini, căldura nu este o formă specială de energie diferită de cea mecanică, ci este tocmai energia cinetică a mișcării moleculelor. Fiecărei temperaturi determinate îi corespunde deci o energie cinetică medie pe moleculă. Aceasta nu este, în adevăr, o ipoteză arbitrară. Sîntem obligați să privim energia cinetică a unei molecule drept măsura temperaturii unui gaz, dacă voim

să ne formăm o imagine mecanică conştientă despre materie.

Această teorie este mai mult decît un joc al imaginaţiei. Se poate dovedi că teoria cinetică a gazelor nu numai că concordă cu experienţa, ci că ea conduce efectiv la o înţelegere mai profundă a faptelor. Să ilustrăm aceasta cu cîteva exemple.

Să considerăm un vas închis cu un piston care se poate mişca liber (fig. 23). Vasul conţine o anumită cantitate de gaz care trebuie menţinută la temperatură constantă. Dacă iniţial pistonul este în repaus într-o anumită poziţie, micşorîndu-i sarcina el se va deplasa în sus, dar mărindu-i-o se va mişca în jos. Deci, pentru a apăsa pistonul în jos, trebuie să-i aplicăm o forţă care să învingă presiunea din interiorul gazului. Care este mecanismul prin care ia naştere această presiune după teoria cinetică? Un număr enorm de particule care alcătuiesc gazul se mişcă în toate direcţiile. Ele bombardează pereţii şi pistonul şi sar înapoi întocmai ca nişte mingi aruncate de perete. Bombardamentul acesta neîntrerupt al unui mare număr de particule ţine pistonul la o anumită înălţime, opunîndu-se forţei de gravitaţie care acţionează, în jos, asupra pistonului şi asupra greutăţilor. Într-un sens acţionează forţa gravitaţională constantă, în sensul celălalt nenumărate lovituri neregulate, imprimate de molecule. Pentru ca echilibrul să se menţină, efectul rezultant exercitat asupra pistonului de mulţimea acestor mici forţe neregulate, trebuie să fie egal cu cel al greutăţii (fig. 23).

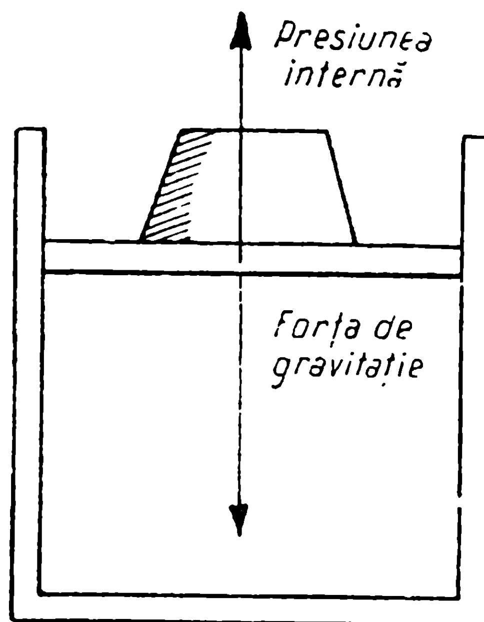


Fig. 23

Să presupunem că pistonul este apăsat în jos, comprimînd gazul pînă la o anumită fracţiune a volumului iniţial, de exemplu pînă la jumătatea lui, temperatura fiind însă păstrată neschimbată. Ce trebuie să urmeze

după teoria cinetică? Forța produsă de bombardament ar urma să fie mai intensă sau mai puțin intensă ? Particulele sînt acum mai înghesuite. Deși energia cinetică medie a rămas aceeași, ciocnirile particulelor asupra pistonului se vor produce mai des ca înainte, astfel că forța totală va crește. Din această imagine a teoriei cinetice reiese limpede că pentru a menține pistonul într-o poziție mai joasă este nevoie de o greutate mai mare.

Acest fapt experimental simplu este bine cunoscut, dar previziunea sa rezultă în mod logic din concepția cinetică a materiei.

Să considerăm un alt dispozitiv experimental. Să luăm două vase cu volume egale, care conțin gaze diferite, de exemplu unul hidrogen și celălalt azot, ambele la aceeași temperatură. Presupunem că cele două vase sînt închise cu pistoane identice și încărcate cu greutăți egale. Pe scurt, aceasta înseamnă că gazele au același volum, sînt la aceeași temperatură și suportă aceeași presiune. Deoarece temperatura este aceeași, energia cinetică medie, pe particulă, conform teoriei, este aceeași. Și întrucît presiunile sînt egale, cele două pistoane vor suporta aceeași forță totală. În medie, fiecare particulă transportă aceeași energie, iar cele două vase avînd același volum, *numărul de molecule trebuie să fie același în fiecare vas,* cu toate că gazele sînt chimic diferite. Rezultatul acesta extrem de important permite înțelegerea multor fenomene chimice. Semnificația lui este că numărul moleculelor conținute într-un volum dat, la o anumită temperatură și la o presiune anumită, este o mărime caracteristică nu numai pentru un gaz anumit, ci pentru toate gazele. Este foarte surprinzător că teoria cinetică nu se mărginește numai să prezică existența unui astfel de număr universal, ci permite și determinarea lui exactă. Vom reveni îndată asupra acestei chestiuni.

Teoria cinetică a materiei explică, atît cantitativ cît și calitativ, legile gazelor găsite pe cale experimentală. Afară de aceasta, aplicabilitatea ei nu este limitată la gaze, cu toate că în domeniul lor ea a obținut succesele cele mai mari.

Un gaz poate fi lichefiat prin coborîrea temperaturii.

Scăderea temperaturii unui corp echivalează cu scăderea energiei cinetice medii a particulelor lui. Este deci limpede că energia cinetică a unei particule lichide este mai mică decît cea a unei particule gazoase corespunzătoare.

O manifestare remarcabilă a mişcării particulelor în lichide a fost descoperită, pentru prima oară, în aşanumita *mişcare browniană*, fenomen remarcabil care ar fi rămas misterios fără *teoria cinetică a materiei*. Această mişcare a fost observată pentru prima oară de botanistul Brown şi explicată mai tîrziu cu 80 de ani, către începutul secolului nostru. Singurul instrument necesar pentru observarea mişcării browniene este microscopul care nici măcar nu este necesar să fie prea puternic.

Brown lucrase cu grăunţe de polen ale anumitor plante, adică, după spusele sale, cu

„... particule sau granule neobişnuit de mari, variind în lungime între unu pe patru mii şi cam unu pe cinci mii dintr-un ţol".

Mai departe el povesteşte :

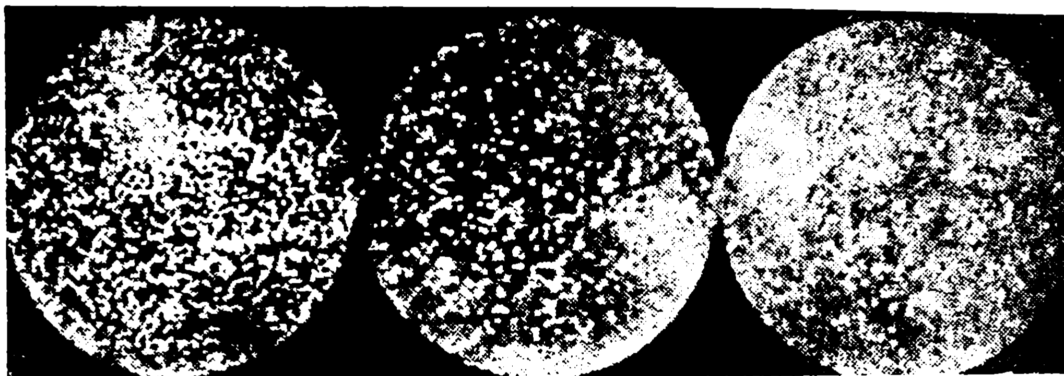
„În timp ce cercetam forma acestor particule, cufundate în apă, am observat că multe dintre ele erau evident în mişcare. ...Aceste mişcări au fost de aşa natură încît, după observaţii repetate, să mă ducă la convingerea că ele nu ar putea fi cauzate nici de curenţi în sînul lichidului, nici de o evaporare treptată a lui, ci că ele aparţin particulelor înseşi".

Ceea ce a observat Brown, a fost o agitaţie neîntreruptă, de care erau cuprinse toate granulele în suspensie în apă, mişcare vizibilă la microscop. A fost un spectacol emoţionant !

Este alegerea specială a plantelor ceva esenţial pentru fenomen? Brown a răspuns la această întrebare repetînd experienţa cu polenul multor plante diferite şi a găsit că toate granulele, dacă erau destul de mici, prezentau o asemenea mişcare cînd erau în suspensie în apă. Mai departe, a pus în evidenţă aceeaşi mişcare dezordonată şi neîncetată şi la particule foarte mici, atît ale unor substanţe organice cît şi anorganice. Chiar cu pulberea provenită dintr-un fragment al unui sfinx a observat acelaşi fenomen.

Care poate fi explicația acestei mișcări ? Ea pare în contrazicere cu toate experiențele anterioare. Înregistrarea, să zicem din 30 în 30 de secunde, a pozițiilor unei particule ne dă o traiectorie de formă fantastică. Lucrul cel mai uluitor este caracterul, după cît se pare, etern al mișcării. Un pendul oscilant introdus în apă se oprește în scurt timp dacă nu este întreținut de o forță exterioară oarecare. Existența unei mișcări care nu încetează niciodată pare contrarie oricărei experiențe. Dificultatea aceasta a fost lămurită în mod strălucit de teoria cinetică a materiei.

Cercetînd, apa, chiar cu microscoapele noastre cele mai puternice, nu vom observa totuși molecule sau mișcarea lor, așa cum și-o reprezintă teoria cinetică a materiei. Trebuie deci să tragem concluzia că, dacă apa este cu adevărat o îngrămădire de particule, atunci dimensiunile lor sînt așa de mici încît, particulele nu pot fi văzute nici chiar cu cele mai bune microscoape. Să-i acordăm încredere teoriei noastre continuînd să adimtem că ea reprezintă o imagine consecventă a realității. Particulele browniene, vizibile la microscop, sînt bombardate de către particulele și mai mici care alcătuiesc apa însăși. Mișcarea browniană există numai dacă particulele bombardate sînt destul de mici. Ea se produce datorită faptului că bombardamentul nu este uniform din toate părțile și nu se poate calcula o valoare medie din cauza caracterului său dezordonat și întîmplător. Mișcarea browniană este deci rezultatul unei mișcări neobservabile. Comportarea particulelor mari oglindește întrucîtva comportarea moleculelor înseși și reprezintă, ca să spunem așa, o amplificare atît de puternică a mișcării încît ea devine observabilă la microscop. Caracterul neregulat de zig-zag întîmplător al drumului parcurs de particulele browniene oglindește o neregularitate asemănătoare a traiectoriilor particulelor mai mici, care constituie materia. Înțelegem astfel, că un studiu cantitativ al mișcării browniene ne va permite să pătrundem mai adînc în teoria cinetică a materiei. Este evident că mișcarea browniană viziblă depinde de mărimea particulelor invizibile care efectuează bombardamentul. N-ar exista nici o miș-



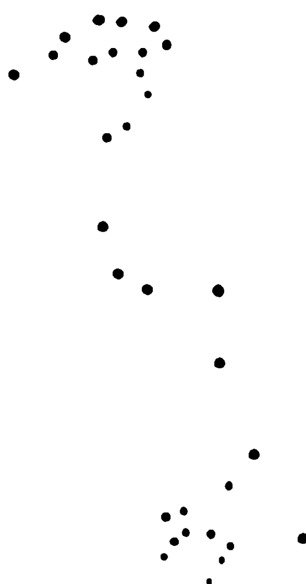
(Fotografiate de J. PERRIN)

Particule în mișcare browniană, văzute la microscop.

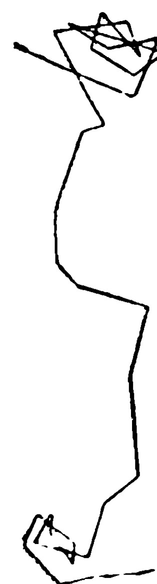


(Fotografiată de Brumberg și Vavilov)

O particulă în mișcare browniană fotografiată după o expunere de lungă durată, acoperind o suprafață.



Pozițiile succesive ale unei particule în mișcare browniană, văzută la microscop.



Drumul mediu, corespunzător pozițiilor succesive ale particulei.

care browniană, dacă moleculele bombardante nu ar avea o anumită energie sau, cu alte cuvinte, dacă n-ar avea masă și viteză. De aceea, nu trebuie să ne mire că studierea mișcării browniene poate conduce la determinarea masei unei molecule.

Prin cercetări laborioase, atît teoretice cît și experimentale, au fost precizate aspectele cantitative ale teoriei cinetice. Calea deschisă de mișcarea browniană este una dintre acelea care au dus la rezultate cantitative. Aceleași date cantitative pot fi însă obținute pe diferite căi avînd puncte de plecare cu totul diferite. Faptul cà toate aceste metode confirmă această concepție este de cea mai mare importanță căci dovedește consistența internă a teoriei cinetice a materiei.

Vom cita numai unul din multele rezultate cantitative, obținute prin experiență și teorie. Să presupunem că avem un gram din elementul cel mai ușor, adică un gram de hidrogen și ne întrebăm cîte particule sînt conținute în acest gram. Răspunsul nu va fi caracteristic numai pentru hidrogen, ci și pentru toate celelalte gaze, căci știm în ce condiții două mase de gaz conțin același număr de particule.

Teoria ne permite să răspundem la această chestiune servindu-ne de anumite măsurări efectuate asupra mișcării browniene a unei particule în suspensie. Rezultatul este un număr neînchipuit de mare : un trei urmat de 23 de cifre ! Un gram de hidrogen conține 303 000 000 000 000 000 000 000 molecule.

Să ne imaginăm moleculele unui gram de hidrogen mărite deajuns pentru a deveni vizibile la microscop, adică diametrul să devină de cinci miimi de milimetru, cît al unei particule browniene. Pentru a le împacheta lipite una de alta am avea atunci nevoie de o ladă cu laturile cam de 400 m.

Putem calcula ușor masa unei asemenea particule de hidrogen, împărțind numărul unu prin numărul de mai sus. Cîtul este un număr inimaginabil de mic :

0,000 000 000 000 000 000 000 003 3 grame, reprezentînd masa unei molecule de hidrogen.

Experiențele asupra mișcării browniene sînt numai

o parte dintre multiplele experiențe, independente, care conduc la determinarea acestui număr care joacă un rol atît de important în fizică.

În toria cinetică a materiei, precum și în toate cuceririle ei însemnate, vedem realizarea unui anumit program filosofic general : reducerea explicării tuturor fenomenelor la interacțiunea particulelor de materie.

In rezumat :

În mecanică traiectoria viitoare a unui corp în mișcare poate fi prevăzută, iar cea trecută determinată, dacă îi cunoaștem condiția prezentă și forțele care-l solicită. Astfel, de exemplu, pot fi prevăzute traiectoriile viitoare ale tuturor planetelor. Forțele active sînt forțele de gravitație ale lui Newton, care depind numai de distanță. Marile rezultate ale mecanicii clasice sugerează că, concepția mecanicistă poate să fie aplicată consecvent în toate ramurile fizicii, că toate fenomenele pot fi explicate prin acțiunea forțelor de atracție și de repulsie, care depind numai de distanță și care se exercită între particule invariabile.

În teoria cinetică a materiei vedem cum acest punct de vedere, rezultat din problemele mecanice, îmbrățișează fenomenele calorice și conduce la o imagine fecundă a structurii materiei.

II. DECLINUL CONCEPȚIEI MECANICISTE

Cele două fluide electrice. — Fluidele magnetice. — Prima dificultate serioasă. — Viteza luminii. — Lumina ca substanță. — Enigma culorii. — Ce este o undă ? — Teoria ondulatorie a luminii. — Undele de lumină sînt longitudinale sau transversale ? — Eterul și concepția mecanicistă.

§ 11. CELE DOUĂ FLUIDE ELECTRICE

Paginile următoare cuprind o expunere puțin captivantă a unor experiențe foarte simple. Expunerea este plictisitoare nu numai datorită faptului că descrierea unei experiențe nu poate fi atît de interesantă ca efectuarea ei, ci și prin aceea că semnificația unei experiențe nu apare decît prin teorie. Scopul nostru este de a da un exemplu deosebit de elocvent, referitor la rolul teoriei în fizică.

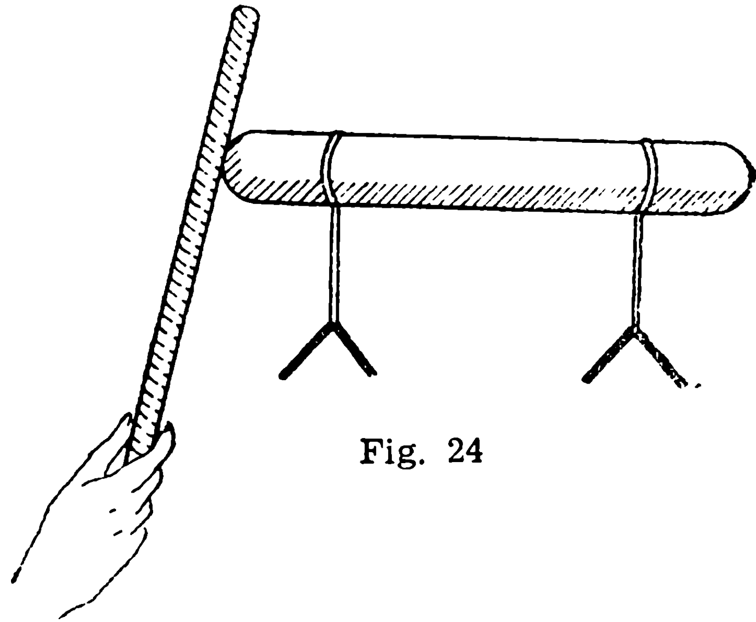


Fig. 24

1. Pe un picior de sticlă este montată o bară metalică ale cărei capete sînt legate prin sîrme cu cîte un electroscop (fig. 24). Ce este un electroscop ? Este un aparat simplu care constă, în esență, din două foițe de aur atîrnate de capătul de jos al unei tije metalice. Totul este introdus într-un vas de sticlă în așa fel încît me-

talul să nu vină în atingere decît cu corpuri nemetalice, numite izolatori. În afară de electroscop și de bara metalică, mai avem nevoie de un baston de ebonită și de o bucată de flanelă.

Experința se face după cum urmează : în primul rînd ne asigurăm că foițele metalice atîrnă lipite una de alta, căci aceasta este poziția lor normală. Dacă din întîmplare ele sînt depărtate, le aducem la normal, atingînd cu degetul bara metalică. O dată terminate aceste pregătiri, frecăm bastonul de ebonită cu bucata de flanelă și apoi îl punem în atingere cu metalul. Imediat foițele metalice se depărtează. Ele rămîn despărțite și după ce bara de ebonită a fost îndepărtată.

2. Să facem o altă experiență în care folosim același aparat ca mai înainte, foițele fiind din nou lipite. De data aceasta însă nu atingem bara metalică cu bastonul de ebonită, ci îl apropiem numai de ea. Foițele metalice se depărtează din nou, însă cu o diferență. Cum se îndepărtează bastonul de ebonită (fără a fi atins bara) ele revin imediat în poziția inițală, în loc să rămînă separate.

3. Să modificăm puțin aparatul nostru pentru o a treia experiență. Să presupunem că bara metalică constă din două părți împreunate. Frecăm din nou bara de ebonită cu bucata de flanelă și o apropiem de metal. Foițele metalice diverg ca mai înainte. Dar dacă separăm bara în cele două părți și numai după aceea îndepărtăm bastonul de ebonită (fig. 25), constatăm că foițele rămîn îndepărtate în loc să revină la poziția lor normală, ca în experiența a doua.

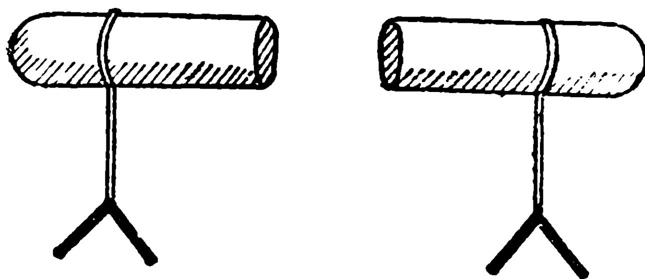


Fig. 25

Este greu de presupus că s-ar putea pasiona cineva pentru aceste experiențe simple și naive. În evul mediu probabil că experimentatorul ar fi fost condamnat ; nouă însă ele ne par nu numai anoste ci și nelogice. Ar fi foarte greu, ca o dată citită descoperirea lor, să le repetăm fără a ne tulbura. O anumită noțiune teoretică le face inteligibile. Am putea spune mai mult : este aproape de necon-

ceput ca astfel de experiențe să fi fost efectuate ca un joc întîmplător, fără o idee prealabilă mai mult sau mai puțin precizată asupra semnificației lor.

Vom indica acum ideile de bază ale unei teorii foarte simple și naive, care explică toate fenomenele descrise.

Există două *fluide electrice*, unul numit *pozitiv* (+), iar altul *negativ* (—). Ele au întrucîtva un caracter de substanță, în sensul explicat mai sus, adică putem mări sau micșora cantitatea lor, dar în orice sistem izolat se conservă suma totală. Există totuși o deosebire esențială între cazul acesta și cel al căldurii, al materiei sau al energiei. Avem două substanțe electrice. În cazul acesta nu putem folosi analogia noastră de mai înainte, cu banii, fără a o generaliza întrucîtva. Un corp este neutru din punct de vedere electric, dacă fluidul electric pozitiv și cel negativ se anulează reciproc. O persoană nu are nici un ban, fie dacă efectiv nu posedă nimic, fie dacă suma pe care a pus-o de o parte în casa de bani este exact egală cu suma pe care o datorează. Am putea compara cele două fluide electrice cu sumele înscrise în rubricile debit și credit ale registrului.

Ipoteza următoare a teoriei este că două fluide electrice de același fel se resping, în vreme ce două fluide opuse se atrag. Aceasta se poate reprezenta grafic în modul arătat în fig. 26.

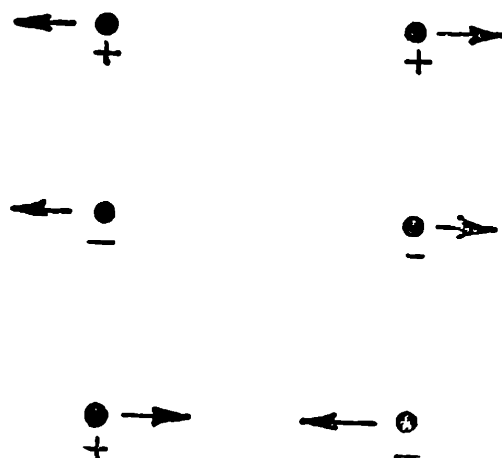


Fig. 26

Trebuie să adoptăm în teoria noastră încă un postulat. Există două feluri de corpuri, și anume, corpuri în care fluidele se pot mișca liber, numite *conductori*, și altele, în care ele nu se pot mișca liber, numite *izolatori*. Ca întotdeauna, în astfel de cazuri, nu trebuie să luăm ad litteram această clasificare. Conductorul ideal sau izolatorul ideal este o ficțiune care nu poate fi niciodată realizată. Metalele, pămîntul, corpul omenesc sînt exemple de conductori, deși nu la fel de buni. Sticla, cauciucul, porțelanul și altele

asemănătoare sînt izolatori. Aerul este un izolator parţial cum ştie oricine care a asistat la experienţele descrise mai sus. Umiditatea aerului, care măreşte conductiblitatea sa, constituie, oricînd, o scuză bună pentru nereuşita unor experienţe de electrostatică.

Ipotezele teoretice menţionate sînt suficiente pentru explicarea celor trei experienţe descrise. Să le discutăm din nou în ordinea în care au fost prezentate, dar de data aceasta în lumina teoriei fluidelor electrice.

1. Bara de ebonită, întocmai ca alte corpuri, este electric neutră, în condiţii normale. Ea conţine, în cantităţi egale, cele două fluide, pozitiv şi negativ. Cînd o frecăm cu flanela, separăm cele două fluide. Această afirmaţie este pur convenţională căci ea nu constituie decît aplicarea terminologiei create de teorie la descrierea procesului de frecare. Felul de electricitate care rămîne în exces după aceea îl numim negativ ; denumirea aceasta este evident tot o chestiune de convenţie. Pentru a ne conforma convenţiei adoptate, excesul care ar fi rezultat prin frecarea unei vergele de sticlă cu o blană de pisică l-am fi numit pozitiv. Să continuăm experienţa şi să comunicăm conductorului metalic fluidul electric, atingîndu-l cu bastonul de ebonită. El se mişcă liber, răspîndindu-se pe tot metalul, inclusiv foiţele de aur. Întrucît acţiunea unei sarcini negative asupra altei sarcini negative este o repulsie, cele două foiţe vor tinde să se îndepărteze cît mai mult una de alta şi rezultatul este separarea observată. Metalul este montat pe un picior de sticlă sau alt izolator, astfel încît fluidul rămîne pe conductor atît timp cît îi permite conductibilitatea aerului. Acum înţelegem şi de ce este necesar să atingem metalul înainte de începerea experienţei. Făcînd aceasta, metalul, corpul şi pămîntul formează un singur conductor imens, pe care fluidul se răspîndeşte diluîndu-se atît de mult încît nu mai rămîne practic nimic pe electroscop.

2. Experienţa aceasta începe exact în acelaşi mod ca şi precedenta. Dar în loc să atingem metalul cu bastonul de ebonită, îl apropiem numai de el. Cele două fluide de pe conductor putîndu-se mişca liber se separă, unul fiind atras, celălalt respins. Îndepărtînd bara de ebonită, ele

se amestecă din nou, deoarece, după cum știm, fluidele de semne contrare se atrag.

3. Acum să separăm bara metalică în două părți și apoi să îndepărtăm bastonul de ebonită. În acest caz, cele două fluide nu se mai pot amesteca, astfel că foițele de aur rămîn depărtate, fiecare pereche purtînd în exces unul din cele două fluide electrice.

În lumina acestei teorii simple, toate faptele prezentate pînă acum par lămurite. Aceeași teorie ne permite chiar să explicăm multe alte fapte din domeniul „electro-

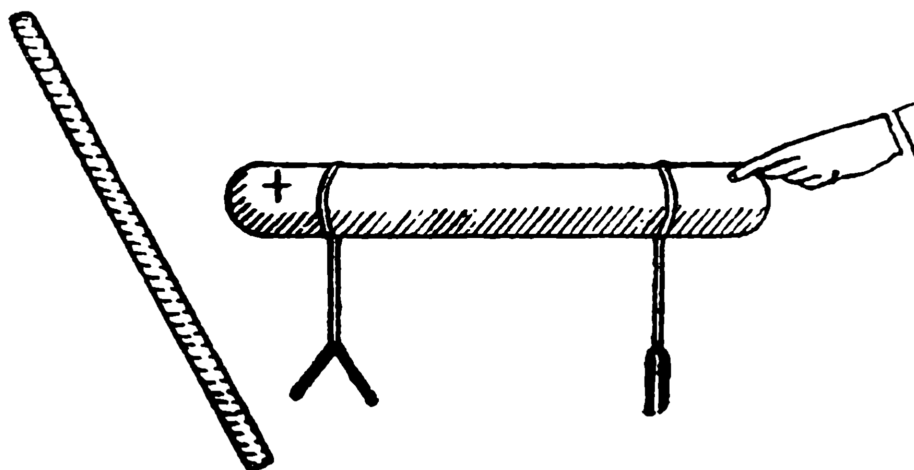


Fig. 27

staticii". Scopul oricărei teorii este de a ne conduce la fapte noi, de a ne sugera noi experiențe și de a ne conduce la descoperirea unor fenomene și legi noi. Un exemplu ne va lămuri. Sà presupunem că modificăm experința a doua în sensul că atingem conductorul cu degetul în timp ce apropiem bastonul de ebonită de el. Ce se va întîmpla ? Conform teoriei, fluidul respins (—) se poate scurge prin corpul nostru astfel că pe conductor va rămîne numai unul din fluide, în cazul de față cel pozitiv. Numai foițele electroscopului mai apropiate de bastonul de ebonită vor rămîne desfăcute (fig. 27). Experiența confirmă prezicerea noastră.

Teoria pe care am expus-o este naivă și insuficientă din punctul de vedere al fizicii moderne. Totuși, este un bun exemplu care arată trăsăturile caracteristice ale oricărei teorii fizice.

Nu există teorii eterne în știință. Se întîmplă uneori ca unele din faptele prezise de teorie să fie contrazise de experință. Fiecare teorie are perioada ei de dezvoltare treptată și de triumf, după care poate suferi un declin rapid. Ascensiunea și căderea teoriei căldurii-substanță, expuse mai sus, constituie unul din multele exemple. Altele, mai profunde și mai însemnate, le vom trata mai tîrziu. Aproape fiecare mare progres științific se naște dintr-o criză a vechii teorii, printr-un efort pentru a găsi o ieșire din dificultățile apărute. De aceea, trebuie să examinăm ideile și teoriile vechi, deși ele aparțin trecutului, deoarce aceasta este singura cale de a înțelege importanța celor noi și de a cunoaște limitele valabilității acestora.

În primele pagini ale acestei cărți am comparat rolul cercetătorului cu cel al unui detectiv care, după ce a adunat faptele necesare, găsește soluția corectă prin simplă reflexiune. Într-un punct esențial, această comparație trebuie considerată foarte superficială. Atît în viață cît și în romanul polițist, crima este un fapt dat ; detectivul trebuie să caute scrisori, amprente digitale, gloanțe, arme, dar el știe cel puțin că s-a comis un asasinat. Pentru omul de știință situația se prezintă altfel. Nu este greu să ne imaginăm o persoană care nu știe nimic despre electricitate, la urma urmei anticii au trăit foarte fericiți fără a o cunoaște de loc. Dacă unui astfel de om i s-ar pune în mînă o bucată de metal, niște foițe de aur, un baston de sticlă, un baston de ebonită și o bucată de flanelă, pe scurt întregul material necesar pentru efectuarea celor trei experiențe ale noastre, atunci chiar dacă ar fi o persoană foarte cultă, după toate probabilitățile, el va umple sticlele cu vin, cîrpa ar folosi-o pentru curățat și nu i-ar trece niciodată prin gînd să facă faptele descrise mai sus. Pentru detectiv, crima este un fapt dat, și se pune problema : cine l-a omorît pe Cock Robin ? Omul de ștință însă trebuie, cel puțin în parte, să comită propria sa crimă și totodată să întreprindă investigațiile. Afară de aceasta, misiunea lui nu se rezumă la lămurirea unui singur caz, ea consistă în explicarea tuturor fenomenelor care au avut loc sau care s-ar mai putea produce.

În introducerea noţiunii de fluid recunoaştem influenţa acelor idei, mecaniciste, care încearcă să explice toate fenomenele cu ajutorul substanţelor și al unor forțe simple care acționează între ele. Pentru a stabili dacă punctul de vedere mecanicist poate fi aplicat și descrierii fenomenelor electrice, să examinăm următoarea problemă : Fie date două sfere mici, ambele încărcate electric, adică în care unul din cele două fluide electrice este în exces. Știm că aceste sfere sau se atrag sau se resping. Dar trebuie ca forța să depindă numai de distanță, și dacă, da, în ce fel? Presupunerea cea mai simplă pare a fi că această forță depinde de distanță ca cea gravitațională care, de exemplu, se reduce la a noua parte din intensitatea ei inițială cînd distanța se triplează. Experiențele efectuate de Coulomb au confirmat valabilitatea acestei legi. O sută de ani după ce Newton descoperise legea gravitației, Coulomb a stabilit pentru forțele electrice o dependență analogă de distanță. Există, totuși, două deosebiri, esenţiale, între legea lui Newton şi cea a lui Coulomb : atracția gravitațională între două corpuri are loc întotdeauna, în vreme ce forțele electrice se exercită numai dacă cele două corpuri au sarcini electrice. În cazul gravitației avem numai atracție, pe cînd forțele electrice pot fi ori de atracție ori de respingere.

Se naște acum aceeași întrebare care a fost examinată în legătură cu căldura : sînt sau nu sînt fluidele electrice substanțe fără greutate ? Cu alte cuvinte, greutatea unei bucăți de metal este aceeași fie că metalul este neutru, fie că este încărcat ? Balanțele noastre nu indică nici o diferență. Conchidem că fluidele electrice fac de asemenea parte din familia substanțelor imponderabile.

Progresul următor în teoria electricității a necesitat introducerea a două noţiuni noi. Vom evita din nou definiţiile riguroase înlocuindu-le cu analogii între conceptele noi și cele de acum familiare. Ne amintim cît de esențială, pentru înțelegerea fenomenelor calorice, fusese distincţia dintre căldură și temperatură.

Este important, de asemenea, să facem o deosebire între potențialul electric și sarcina electrică. Deosebirea

dintre cele două concepte reiese foarte limpede din următoarea analogie :

potențial electric — temperatură

sarcină electrică — căldură

Doi conductori, de exemplu două sfere, de mărimi diferite, care conțin aceeași sarcină electrică, adică același exces al unuia din cele două fluide electrice, vor avea totuşi potenţiale diferite și anume : sfera mai mică va avea potenţialul mai înalt și sfera mai mare potențialul mai mic. În adevăr, fluidul electric va avea o densitate mai mare, va fi mai înghesuit, pe conductorul mai mic. Cum forțele de respingere cresc cu densitatea, tendința sarcinilor de a se desprinde de conductor este mai mare în cazul sferei mici decît în cazul sferei mari. Tendința aceasta a sarcinilor, de a părăsi conductorul, este o măsură directă a potențialului lor. Pentru a arăta clar diferența dintre sarcină și potențial, vom formula unele caracteristici care descriu comportarea corpurilor încălzite și caracteristicile corespunzătoare ale comportării conductorilor încărcați.

CĂLDURĂ	ELECTRICITATE
Două corpuri, inițial la temperaturi diferite, ajung după un timp la aceeași temperatură, dacă sînt aduse în contact.	Doi conductori izolați, inițial la potențiale electrice diferite, ajung foarte repede la acelaşi potențial, dacă sînt puși în contact.
Cantități egale de căldură produc variații de temperatură diferite în corpuri, dacă acestea au călduri specifice diferite.	Cantități egale ale unei sarcini electrice produc variații diferite ale potențialului electric a două corpuri, dacă acestea au capacități electrice diferite.
Un termometru în atingere cu un corp indică, prin lungimea coloanei sale de mercur, temperatura sa proprie și deci și temperatura corpului.	Un electroscop în contact cu un conductor indică, prin îndepărtarea foițelor de aur, propriul său potențial electric și, prin urmare, cel al conductorului.

Dar această analogie nu trebuie împinsă prea departe. Un exemplu ne va arăta atît deosebirile, cît și asemănările. Dacă un corp cald este pus în contact cu unul rece, căldura curge de la corpul mai cald la cel mai rece. Să

considerăm acum doi conductori izolați avînd sarcini egale dar de nume contrare, unul sarcină pozitivă, celălalt sarcină negativă ; potențialele lor vor fi diferite. Prin convenție, considerăm potențialul corespunzător sarcinii negative mai scăzut decît pe cel al sarcinii pozitive. Dacă conductorii sînt puși în contact, sau legați printr-o sîrmă, potrivit teoriei fluidelor electrice, ei nu vor mai avea nici o sarcină și deci nici o diferență de potențial electric. Trebuie să ne imaginăm că în scurtul interval de timp în care s-a anulat diferența de potențial, sarcina electrică „a curs" de la un conductor la celălalt. Dar cum ? A curs fluidul pozitiv către corpul negativ sau fluidul negativ către corpul pozitiv ?

Materialul prezentat pînă acum nu oferă nici o bază pentru a decide între aceste două posibilități. Putem s-o admitem fie pe una, fie pe cealaltă, fie că scurgerea are loc simultan în ambele sensuri. Totul este o chestiune de convenție și nu trebuie să atașăm nici o semnificație alegerii noastre, dat fiind că nu cunoaștem nici o metodă de a decide prin experiență. Dezvoltarea ulterioară care a condus la o teorie mult mai profundă a electricității, a dat un răspuns acestei întrebări, dar care este aproape fără sens dacă este formulat cu terminologia teoriei simple și primitive a fluidelor electrice. Vom adopta următorul mod de exprimare. Fluidul electric curge de la conductorul cu potențialul mai ridicat la cel cu potențialul mai scăzut. În cazul celor doi conductori considerați, electricitatea curge deci de la cel încărcat pozitiv la cel încărcat negativ (fig. 28). Această exprimare este pur convențională și ca atare cu totul arbitrară. Din această dificultate reiese că analogia dintre căldură și electricitate nu este cîtuși de puțin completă.

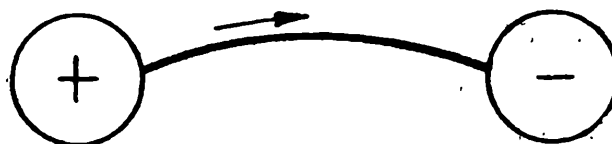


Fig. 28

Am văzut că se poate adopta concepția mecanicistă la descrierea faptelor elementare ale electrostaticii. Acest lucru este posibil și în cazul fenomenelor magnetice.

§ 12. FLUIDELE MAGNETICE

Vom proceda în cazul acesta la fel ca mai înainte, începînd cu fapte foarte simple și căutînd apoi să le explicăm teoretic.

1. Avem două bare magnetice lungi : una suspendată liber în centrul ei, pe cealaltă o ținem în mînă (fig. 29). Apropiem capetele lor pînă constatăm că ele se atrag

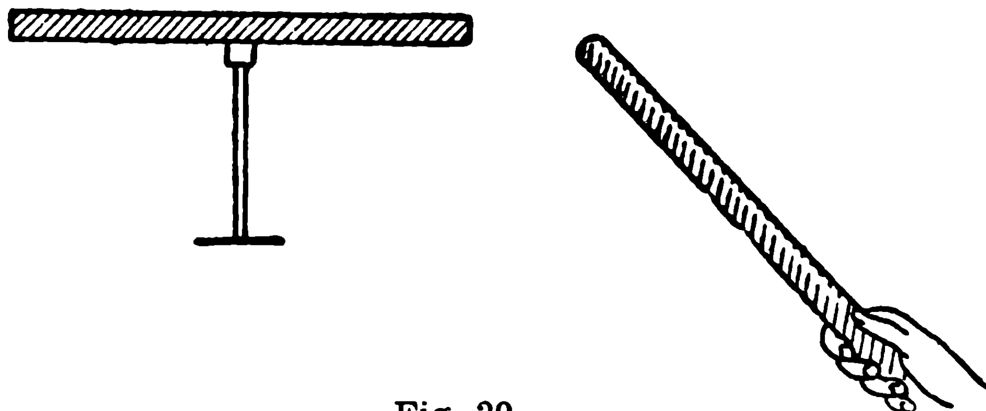


Fig. 29

puternic. Aceasta se poate realiza întotdeauna ; dacă nu se constată atracție întoarcem magnetul și încercăm cu capătul celălalt. Trebuie să se petreacă ceva, dacă barele sînt magnetice. Capetele magneților le numim *poli*. În continuarea experienței, plimbăm polul magnetului ținut în mînă, în lungul celuilalt magnet. Constatăm că atracția descrește, iar cînd polul trece prin dreptul centrului magnetului suspendat nu se mai manifestă nici o forță. Deplasînd polul mai departe în aceeași direcție, constatăm o respingere, care atinge maximum de intensitate la polul celălalt al magnetului suspendat.

2. Experiența de mai sus sugerează o alta. Fiecare magnet are doi poli ; am putea oare izola unul din ei? Soluția este simplă : rupem un magnet în două părți egale. Am văzut doar că nu se exercită nici o forță între polul unui magnet și mijlocul altui magnet. Dar, dacă rupem în adevăr un magnet în două părți egale, constatăm un lucru surprinzător și neprevăzut. Repetînd experiența descrisă la punctul 1 cu oricare din aceste jumătăți de magnet, de asemenea suspendată liber, fenomenele sînt aceleași ca mai înainte. Acolo unde mai înainte nu se ma-

nifesta nici o urmă de forță magnetică, a apărut acum un pol puternic.

Cum trebuie explicate aceste fapte? Am putea încerca să construim o teorie a magnetismului pe calapodul teoriei fluidelor electrice. Ideea ne este sugerată de faptul că și în magnetism avem atracție și respingere întocmai ca în cazul fenomenelor electrostatice. Să considerăm doi conductori sferici, încărcați cu sarcini egale, unul cu sarcini pozitive, celălalt cu sarcini negative.

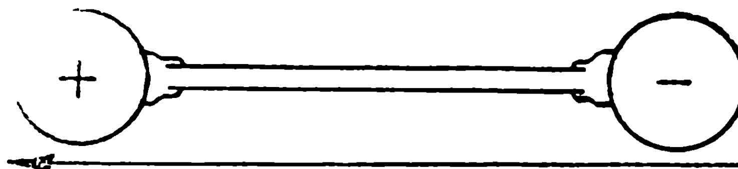


Fig. 30

În cazul de față, „egale“ înseamnă că au aceeași valoare absolută dar semne contrare, ca de exemplu + 5 și — 5. Să presupunem că aceste sfere sînt unite între ele printr-un izolator, de exemplu printr-o bară de sticlă. Schematic ansamblul acesta poate fi reprezentat printr-o săgeată îndreptată de la conductorul negativ către cel pozitiv (fig. 30). Vom numi întregul sistem un *dipol* electric. Este clar că doi asemenea dipoli se vor comporta exact la fel ca barele magnetice în experiența 1. Dacă adoptăm drept model al unui magnet real sistemul inventat de noi, putem spune, admițînd existența unui fluid magnetic, că un magnet nu este altceva decît un *dipol magnetic,* care la capete conține două fluide diferite. Această teorie simplă, care imită teoria electricității, este suficientă pentru a explica prima experiență. Ea ne dă atracție la un capăt, respingere la celălalt și la mijloc compensarea forțelor egale și opuse. Cum rămîne însă cu experiența a doua? Cînd rupem bara de sticlă care formează dipolul electric, rezultă doi poli izolați. Același lucru ar trebui să se întîmple și cu bara de fier care formează dipolul magnetic, dar faptul acesta este contrazis de rezultatul experienței a doua. Contradicția aceasta ne silește să introducem o teorie ceva mai subtilă. În locul modelului precedent, admitem că magnetul constă din niște dipoli magnetici *elementari* foarte mici, care nu mai pot fi rupți în poli separați. In magnetul luat ca un tot stăpînește ordinea, toți dipolii fiind orientați la fel (fig. 31). Rezultă imediat de ce, tăind

magnetul, apar noi poli la noile capete, precum și de ce această teorie perfecționată explică atît experiența 1 cît și experiența 2.

Pentru multe fapte, teoria simplă dă o explicație, iar o perfecționare nu pare necesară. Să luăm un exemplu. știm că un magnet aatrage bucăți de fier. De ce? Într-o bucată de fier obișnuit cele două fluide magnetice sînt amestecate, astfel că nu se constată nici un efect exterior. Apropiind un pol pozitiv, el acționează asupra fluidelor ca o „comandă de separare" adresată fluidelor. El atrage fluidul negativ și-l respinge pe cel pozitiv. Rezultă atracția dintre fier și magnet. Dacă îndepărtăm magnetul, fluidele își reiau starea inițială în măsură mai mare sau mai mică, în funcție de tăria cu care le mai răsună în „urechi" vocea de comandă a forțelor exterioare.

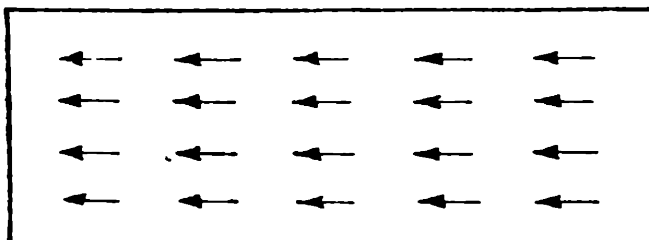


Fig. 31

Rămîne puțin de spus asupra părții cantitative a problemei. Cu două bare magnetizate, foarte lungi, putem să examinăm atracția (sau respingerea) polilor lor, dacă le apropiem. Efectul celorlalte extremități ale barelor este neglijabil, dacă barele sînt destul de lungi. Cum depinde atracția, respectiv respingerea, de distanța dintre cei doi poli? Răspunsul dat de experiența lui Coulomb este că această dependentă de distanță este aceeași ca în legea gravitației a lui Newton și în legea electrostatică a lui Coulomb.

Regăsim din nou, în această teorie, aplicarea unui punct de vedere general: tendința de a descrie toate fenomenele cu ajutorul unor forțe de atracție sau de respingere, cari depind numai de distanță și acționează între particule invariabile.

Vom aminti un fapt bine cunoscut, pe care-l vom folosi mai tîrziu. Pămîntul este un mare dipol magnetic. Nu există nici urmă de explicație a acestui fapt. Polul nord coincide aproximativ cu polul negativ (—) magnetic al Pămîntului și polul sud cu polul pozitiv (+). Denumirile po-

zitiv și negativ sînt numai o chestie de convenție, dar odată fixate, ele ne pun în măsură să indicăm polii în oricare alt caz. Un ac magnetic care se poate roti în jurul unui ax vertical se supune comenzii forței magnetice a Pămîntului. El se îndreaptă cu polul (+) către polul nord, adică spre polul (—) magnetic al Pămîntului.

Chiar dacă putem aplica în mod consecvent concepția mecanicistă a fenomenelor electrice și mecanice tratate pînă acum, nu avem nici un motiv să fim prea mîndri sau încîntați de aceasta. Unele aspecte ale teoriei sînt nesatisfăcătoare, dacă nu chiar descurajatoare. Au trebuit să fie inventate noi feluri de substanțe : cele două fluide electrice și dipolii magnetici elementari. Abundența substanțelor începe să ne copleșească.

Forțele sînt simple. Forțele gravitaționale, electrice, magnetice, pot fi exprimate în același mod.

Dar această simplicitate este scump plătită : cu introducerea unor noi substanțe fără greutate. Acestea sînt noțiuni cam artificiale și fără nici o legătură cu substanța fundamentală, masa.

§ 13. PRIMA DIFICULTATE SERIOASĂ

Sîntem acum gata să semnalăm prima mare dificultate întîmpinată de aplicarea punctului nostru de vedere filosofic general. Vom arăta mai tîrziu că această dificultate, împreună cu o alta și mai serioasă, a provocat spulberarea credinței că toate fenomenele pot fi explicate din punctul de vedere mecanicist.

Dezvoltarea uriașă a electricității, ca ramură a științei și tehnicii, a început o dată cu descoperirea curentului electric. Aici găsim în istoria științei unul din foarte puținele exemple în care întîmplarea pare să fi jucat un rol esențial. Povestea contracțiilor piciorului de broască este prezentată în multe versiuni diferite. Fără a ne preocupa de adevărul cu privire la amănunte, un lucru este sigur, anume că descoperirea întîmplătoare a lui Galvani, l-a condus pe Volta, către sfîrșitul secolului al XVIII-lea, la construirea așa-numitei *baterii voltaice*. Ea nu se mai folosește în practică, dar continuă încă să constituie un

exemplu foarte simplu de sursă de curent în demonstrațiile de curs și în descrierile din manuale.

Principiul ei de construcție este simplu. Ea constă din mai multe vase de sticlă umplute cu apă în care s-a turnat puțin acid sulfuric. În fiecare vas sînt cufundate, în soluție, două plăci metalice, una de cupru și alta de zinc. Placa de cupru a unui vas este legată cu placa de zinc a următorului, astfel că numai placa de zinc a primului și placa de cupru a ultimului vas rămîn libere. Putem decela o diferență de potențial electric între placa de zinc din primul vas și placa de cupru din ultimul vas cu ajutorul unui electroscop destul de sensibil, dacă numărul „elementelor" adică al vaselor prevăzute cu plăci, cari alcătuiesc bateria, este destul de mare.

Numai în scopul de a obține un efect ușor măsurabil cu aparatul descris, am introdus o baterie compusă din mai multe elemente. De aici înainte un singur element ne va sluji tot atît de bine. Se constată că potențialul cuprului este mai înalt decît cel al zincului și anume în sensul în care +2 este mai mare decît — 2. Dacă se leagă un conductor de placa de cupru liberă și un al doilea de cea de zinc, atunci ambii se vor încărca electric, primul pozitiv, al doilea negativ. Pînă acum n-a intervenit nimic prea nou sau surprinzător, astfel că putem încerca să folosim ideile noastre anterioare asupra diferențelor de potențial. Am văzut că diferența de potențial dintre doi conductori poate fi anulată repede prin legarea lor cu o sîrmă, producîndu-se un flux de fluid electric de la un conductor la celălalt. Acest proces este asemănător cu egalizarea temperaturilor prin fluxul de căldură. Se constată același lucru și în cazul bateriei voltaice? În memoriul său, Volta a scris că plăcile se comportă ca niște conductori :

„...slab încărcați, cari acționează fără întrerupere sau astfel ca sarcina lor să se regenereze singură, după fiecare descărcare ; într-un cuvînt, produc o sarcină nelimitată sau exercită o acțiune sau un impuls continuu asupra fluidului electric.

Rezultatul uluitor al acestei experiențe este că diferenta de potențial dintre cupru și zinc nu dispare ca în cazul a doi conductori încărcați, uniți printr-o sîrmă. Di-

ferenţa persistă şi, potrivit teoriei fluidelor, ea trebuie să determine o curgere constantă de fluid electric de la nivelul mai înalt (placa de cupru) la cel mai jos (placa de zinc). Am putea încerca să salvăm teoria fluidelor, presupunînd că o forţă constantă acţionează astfel încît să restabilească diferenţa de potenţial, producînd o curgere a fluidului electric. Dar întregul fenomen este uimitor din punct de vedere al energiei. O cantitate apreciabilă de căldură se dezvoltă în sîrma străbătută de curent, suficientă chiar să topească sîrma, dacă aceasta este subţire. Deci în sîrmă se dezvoltă energie calorică. Dar întreaga baterie voltaică formează un sistem izolat deoarece nu primeşte energie din exterior. Dacă vrem să salvăm legea conservării energiei, trebuie să stabilim unde au loc transformările şi în dauna cui apare căldura. Nu este greu să ne dăm seama că în baterie au loc procese chimice complicate, în care joacă un rol activ cuprul şi zincul împlîntaţi în soluţie, precum şi lichidul însuşi. Din punctul de vedere energetic, lanţul de transformări care au loc este următorul: energia chimică → energia fluidului electric în curgere (adică energia curentului electric) → căldura. O baterie voltaică nu ţine la infinit ; transformările chimice asociate cu fluxul de electricitate fac bateria neutilizabilă după un timp.

Experienţa care cu adevărat a scos la lumină marile dificultăţi în aplicarea concepţiei mecaniciste va părea stranie celui care o aude pentru prima oară. Ea a fost efectuată acum vreo 120 de ani de către Oersted. El scrie:

„Prin aceste experienţe pare dovedit că acul magnetic a fost deplasat din poziţia sa normală cu ajutorul unui element galvanic şi anume cînd circuitul galvanic era închis, nu deschis cum au încercat zadarnic să arate anumiţi fizicieni foarte renumiţi acum cîţiva ani".

Să presupunem că avem o baterie voltaică şi un fir conductor. Dacă sîrma este legată de placa de cupru fără a fi legată şi la cea de zinc, va exista o diferenţă de potenţial, dar curentul nu va putea să circule. Să presupunem că am îndoit firul astfel încît să formeze un cerc, în al cărui centru este situat un ac magnetic, cercul şi acul magnetic fiind în acelaşi plan. Atît timp cît firul nu

atinge placa de zinc, nu se întîmplă nimic, nu acționează nici o forță, diferența de potențial neavînd nici o influență asupra poziției acului. Este greu de înțeles de ce fizicienii „foarte vestiți", cum îi numește Oersted, se așteptau la o asemenea influență.

Să unim însă acum sîrma și placa de zinc. Numai decît se va produce un lucru ciudat : acul magnetic se va roti în poziția sa. Unul din polii lui va fi îndreptat spre cititor, dacă foaia acestei cărți reprezintă planul cercului. Efectul acesta se datorește unei forțe care acționează asupra polului magnetic și este *perpendiculară* pe plan (fig 32). Față de aceste fapte experimentale cu greu am putea evita să tragem o astfel de concluzie cu privire la direcția forței care acționează.

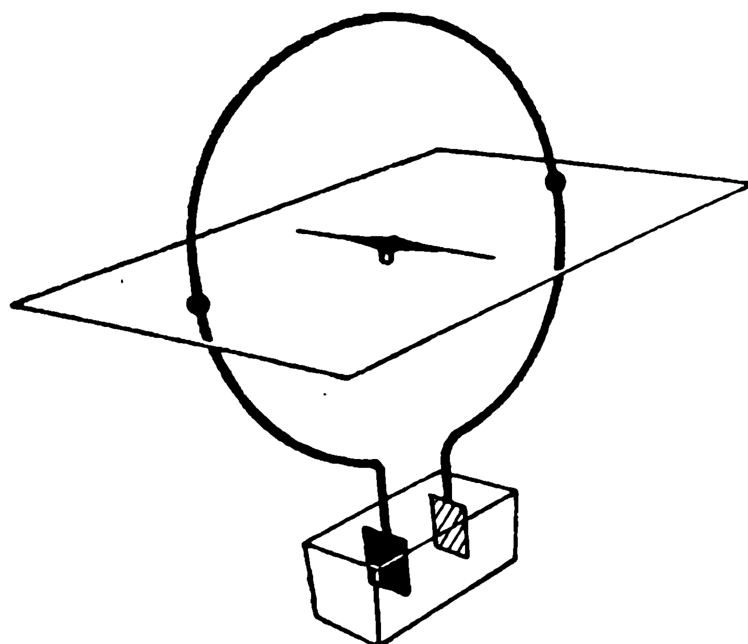


Fig.32

Experiența aceasta este interesantă, mai întîi deoarece arată o legătură între două fenomene care par cu totul diferite : magnetismul și curentul electric. Dar ea are un alt aspect chiar mai important. Forța care se exercită între polul magnetic și fiecare din micile porțiuni de sîrma de-a lungul căreia curge curentul nu poate fi orientată în lungul liniei care unește sîrma cu acul, sau care unește particulele fluidului electric cu dipolii magnetici elementari. Forța este perpendiculară pe aceste linii. Pentru prima dată își face apariția o forță cu totul diferită de cele la care, potrivit punctului nostru de vedere mecanicist, încercasem să reducem toate acțiunile din lumea exterioară. Ne amintim că forțele gravitaționale, electrostatice și magnetice, conform legilor lui Newton și Coulomb, acționează în lungul liniei care unește cele două corpuri, care se atrag sau se resping.

Această dificultate a fost accentuată de o experiență efectuată cu mare îndemînare de Rowland, în urmă cu aproape 60 de ani. Lăsînd la o parte amănuntele tehnice, această experiență poate fi descrisă după cum urmează. Fie o mică sferă încărcată. Să ne imaginăm că această sferă se mișcă foarte repede pe un cerc în al cărui centru este un ac magnetic. În principiu experiența aceasta este identică cu acea a lui Oersted, cu diferența că spre deosebire de curentul electric obișnuit, mișcarea sarcinii electrice este produsă pe cale mecanică. Rowland a stabilit că rezultatul este în adevăr asemănător cu cel observat la trecerea unui curent printr-o sîrmă circulară (fig. 33). Magnetul este deviat de către o forță perpendiculară.

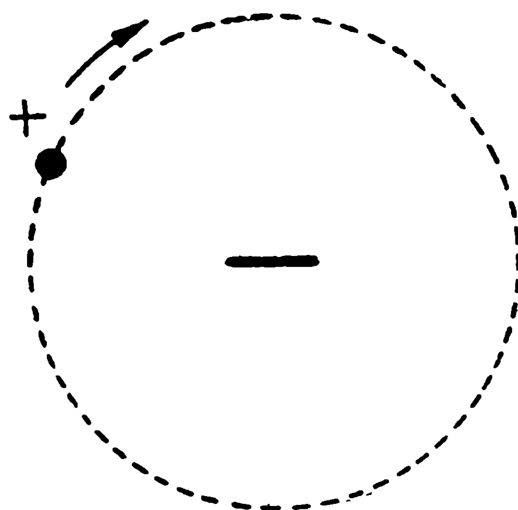


Fig. 33

Să mișcăm acum sarcina electrică din ce în ce mai repede. Forța care acționează asupra polului magnetic crește ; devierea de la poziția inițială devine mai accentuată. Această observație prezintă o altă complicație foarte gravă. Nu numai că forța nu acționează în lungul liniei care unește sarcina cu magnetul, ci intensitatea forței depinde de viteza sarcinii. Întreaga concepție mecanicistă se baza pe convingerea că toate fenomenele pot fi explicate prin jocul unor forțe care depind numai de distanță și nu de viteză. Rezultatul experienței lui Rowland, ne sdruncină evident această credință. Putem însă încerca să fim conservatori, căutînd o soluție în cadrul vechilor idei.

Dificultăți de acest fel, piedici subite și neașteptate în dezvoltarea triumfală a unei teorii, se ivesc frecvent în știință. Uneori o simplă generalizare a ideilor vechi pare să constituie, cel puțin temporar, o ieșire din impas. Astfel, în cazul de față, se pare că este de ajuns să lărgim punctul de vedere anterior și să introducem forțe mai generale între particulele elementare. Foarte

des însă ne este imposibil să reparăm o teorie veche şi atunci dificultăţile provoacă prăbuşirea ei şi naşterea unei teorii noi. Aici, nu numai comportarea micului ac magnetic a ruinat teoriile mecaniciste, în aparenţă aşa de bine fundate şi încununate de succes. Un alt atac, şi mai puternic încă, a venit din cu totul altă parte. Dar aceasta este o altă poveste pe care o vom istorisi mai tîrziu.

§ 14. VITEZA LUMINII

În *„Două ştiinţe noi"* a lui Galileu, asistăm la discuţia dintre un profesor şi elevii săi, asupra vitezei luminii :

Sagredo : Dar de ce natură este viteza luminii şi cît de mare trebuie considerată ? Este ea instantanee, sau are nevoie de timp, la fel ca alte mişcări ? Nu putem decide aceasta printr-o experienţă ?

Simplicio : Experienţa de toate zilele ne arată că propagarea luminii este instantanee, deoarece cînd privim de la mare depărtare o salvă de artilerie, flacăra ajunge la ochiul nostru fără pierdere de timp, dar sunetul ajunge la ureche numai după un interval perceptibil.

Sagredo : Bine Simplicio, singurul lucru pe care-l pot deduce din această experienţă obişnuită este că sunetul care ajunge la urechea noastră se deplasează mai încet decît lumina. Dar ea nu mă informează dacă sosirea luminii este instantanee sau dacă, deşi foarte rapidă, ea necesită totuşi un timp.

Salviati : Concluzia puţin sigură a acestor observaţii şi a altora asemănătoare m-a condus să imaginez o metodă cu ajutorul căreia s-ar putea stabili în mod exact dacă propagarea luminii este cu adevărat instantanee..."

Salviati continuă să explice metoda experienţei sale. Pentru a putea înţelege ideea lui să ne închipuim că viteza luminii este nu numai finită ci şi mică, adică propagarea luminii este încetinită ca mişcarea unui film rulat cu încetinitorul. Doi oameni *A* şi *B* avînd lanterne acoperite stau la o distanţă, să zicem, de un kilometru unul de altul. Ei au convenit ca *A* să descopere primul lanterna, iar *B* să o descopere pe a sa, imediat ce vede lumină la *A*. Să presupunem că în „mişcarea noastră încetinită", lumina face un kilometru pe secundă. *A* trimite un semnal, descoperind lanterna sa, *B* îl vede după o secundă şi trimite un semnal de răspuns. *A* îl primeşte două secunde

după ce îl trimisese pe al său. Așadar, dacă lumina călătorește cu o iuțeală de un kilometru pe secundă, se vor scurge două secunde între momentul cînd trimite și momentul cînd primește *A* semnalul, presupunînd că *B* este la o depărtare de un kilometru. Invers, dacă *A* nu cunoaște viteza luminii dar presupune că tovarășul lui respectă înțelegerea și dacă el observă dezvelirea lanternei lui *B* două secunde după ce a descoperit-o pe a sa, el poate deduce că viteza luminii este de un kilometru pe secundă.

Cu tehnica experimentală de care se dispunea la vremea aceea Galileu avea puține șanse de a determina viteza luminii pe calea aceasta. Dacă distanța ar fi fost de un kilometru, el ar fi trebuit să poată măsura intervale de timp de ordinul a trei microsecunde ($3 \cdot 10^{-6}$ secunde).

Galileu a formulat problema determinării vitezei luminii, dar nu a rezolvat-o. Deseori formularea unei probleme este mai esențială decît rezolvarea ei, care poate fi o chestiune de îndemînare matematică sau experimentală. A pune noi probleme, a descoperi noi posibilități, a privi probleme vechi dintr-un punct de vedere nou, implică imaginație creatoare și marchează un progres real în știință. Principiul inerției și legea conservării energiei au fost dobîndite numai prin gîndire nouă și originală asupra unor experiențe și fenomene bine cunoscute la vremea lor. Multe exemple de acest fel se vor întîlni în paginile care urmează, în care se va sublinia importanța reconsiderării unor fapte cunoscute, într-o lumină nouă și în care se vor descrie noi teorii.

Revenind la problema relativ simplă a determinării vitezei luminii, observăm că este surprinzător că Galileu nu și-a dat seama că această experiență ar putea fi efectuată mai simplu și mai precis de către o singură persoană. În locul ajutorului său, el ar fi putut așeza la depărtarea dorită o oglindă, care ar fi trimis semnalul înapoi, în mod automat, de îndată ce l-ar fi primit.

Tocmai de acest principiu s-a folosit vreo 250 de ani mai tîrziu Fizeau, primul care a determinat viteza luminii cu ajutorul unei experiențe terestre; Römer o determinase mult mai înainte, dar mai puțin exact, pe bază de observații astronomice.

Este limpede că, dată fiind valoarea ei enormă, viteza luminii ar fi putut fi determinată fie luînd distanțe comparabile cu aceea dintre Pămînt și o altă planetă a sistemului solar, fie grație unei mari perfecționări a tehnicii experimentale. Prima metodă a fost utilizată de Rőmer, cea de a doua de Fizeau. Începînd de la aceste prime experiențe, extrem de importantul număr reprezentînd viteza luminii a fost determinat de multe ori cu o exactitate din ce în ce mai mare. În secolul nostru, o tehnică foarte rafinată a fost imaginată în acest scop de Michelson. Rezultatul acestor experiențe poate fi exprimat simplu : viteza luminii *în vid* este de aproximativ 186 000 mile pe secundă, sau 300 000 kilometri pe secundă.

§ 15. LUMINA CA SUBSTANȚĂ

Vom începe din nou cu cîteva fapte experimentale. Numărul indicat mai sus se referă la viteza luminii *în vid*. Lumina se propagă neperturbată cu această viteză, în vid. Putem vedea aceasta printr-un vas de sticlă dacă am scos aerul din el. Vedem planetele, stelele și nebuloasele, deși pentru a ajunge de la ele pînă la ochiul nostru, lumina trebuie să treacă prin vid. Simplul fapt că putem vedea printr- un vas, indiferent dacă el conține aer sau nu, dovedește că prezența aerului contează foarte puțin. De aceea, putem efectua experiențe optice într-o cameră obișnuită cu același efect ca și cum nu ar fi aer în ea.

Unul din cele mai simple fapte optice este că lumina se propagă în linie dreaptă. Vom descrie o experiență simplă și naivă care arată aceasta. În fața unei surse punctiforme așezăm un ecran avînd un orificiu. O sursă punctiformă este o sursă de lumină foarte mică, de exemplu, o deschidere foarte fină la o lanternă cu diafragmă. Pe un perete îndepărtat fanta ecranului se va prezenta ca o pată de lumină pe un fond întunecat. Figura 34 arată cum este legat acest fenomen de propagarea rectilinie a luminii. Toate fenomenele similare, chiar cele mai complicate, în care apar lumină, umbră și penumbră, pot fi explicate cu ajutorul presupunerii că lumina se propagă în linie dreaptă *în vid* și în aer.

Să luăm alt exemplu în care lumina trece prin materie. O rază de lumină trece prin vid și cade pe o placă cu sticlă. Ce se va întîmpla? Dacă legea mișcării in linie dreaptă ar fi valabilă și în cazul acesta, drumul razei ar trebui să fie cel indicat de linia punctată *01*. În realitate însă nu se întîmplă așa (fig. 35). Raza se frînge, cum arată figura. Fenomenul acesta este cunoscut sub numele de *refracție*. Fenomenul obișnuit al bățului care pare frînt

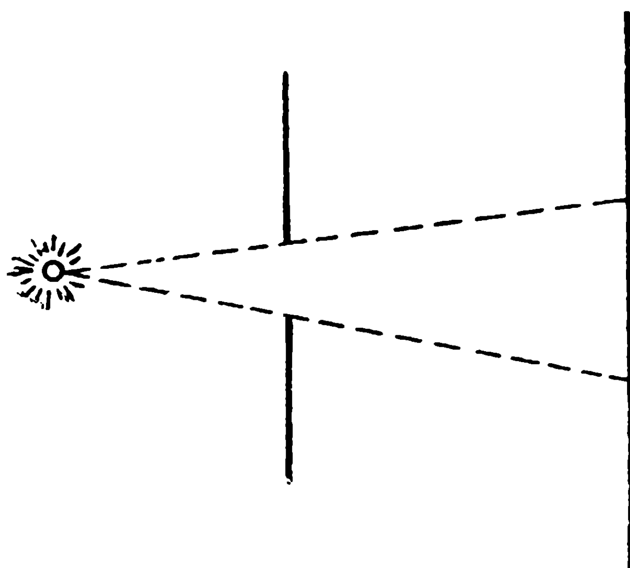


Fig. 34

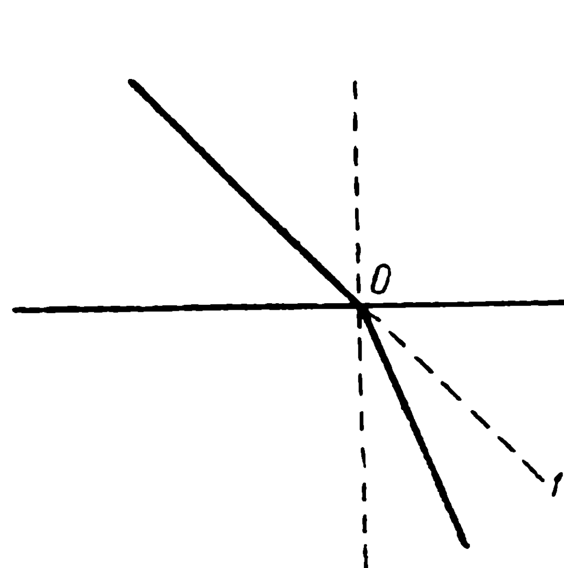
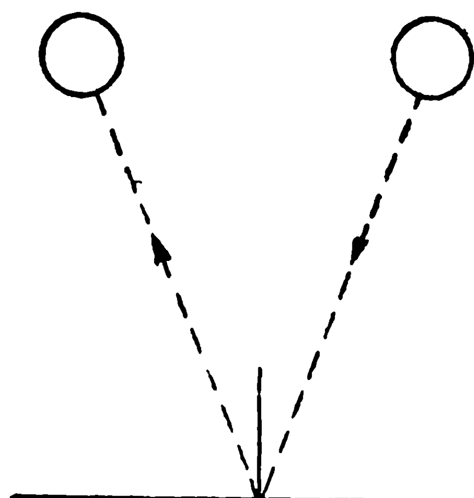


Fig. 35

la mijloc cînd este pe jumătate cufundat în apă este una din multele manifestări ale refracției. Aceste fapte sînt suficiente pentru a indica cum s-a putut imagina o teorie mecanicistă simplă a luminii. Ținta noastră este să arătăm cum au pătruns în domeniul opticii conceptele de substanță, particulă și forță și cum s-a prăbușit, în cele din urmă, vechiul punct de vedere filosofic.

În cazul de față teoria se sugerează singură în forma ei cea mai simplă și mai primitivă. Ea presupune că toate corpurile luminoase emit particule de lumină sau *corpuscule* care, căzînd pe ochiul nostru, provoacă senzația de lumină. Sîntem atît de deprinși să introducem substanțe noi, dacă este necesar, pentru o explicație mecanicistă, încît putem face acest lucru și de data aceasta fără multă ezitare. Aceste corpuscule trebuie să se miște în vid după linii drepte, cu o viteză cunoscută, aducînd ochiului nostru un mesagiu de la corpurile care emit lumină. Toate

fenomenele care pun în evidență propagarea rectilinie a luminii admit teoria corpusculară, căci acesta este tipul de mişcare ce fusese prescris pentru corpuscule. Teoria explică, de asemenea, foarte simplu reflexia luminii pe oglinzi, asimilînd-o cu reflexia unor mingi (elastice) aruncate de perete, ca în experiența mecanică schițată în fig. 36.


Fig 36

Explicația refracției este puțin mai grea. Fără a intra în amănunte, putem întrevedea în ce sens ar fi posibilă o explicație mecanicistă. Ar fi de ajuns să admitem că, atunci cînd corpusculele cad, de exemplu pe o suprafață de sticlă, particulele de materie acționează asupra lor ca o forță care s-ar exercita destul de straniu numai în imediata vecinătate a materiei. Orice forță care acționează asupra unei particule în mişcare, îi schimbă viteza, după cum ştim. Dacă forța rezultantă asupra corpusculului de lumină ar fi o atracție perpendiculară pe suprafața sticlei, atunci noua lui direcție de mişcare va fi situată undeva între prelungirea drumului inițial şi perpendiculară. Această explicație simplă pare să făgăduiască succes teoriei corpusculare a luminii. Pentru a stabili utilitatea şi domeniul de valabilitate al teoriei, trebuie totuşi să cercetăm fapte noi şi mai complicate.

§ 16. ENIGMA CULORII

Tot geniul lui Newton a explicat pentru prima oară lumea culorilor în Univers. Iată una din experiențele lui Newton, descrisă cu propriile lui cuvinte :

„În anul 1666 (pe cînd mă ocupam cu şlefuirea sticlelor optice, de alte forme decît cea sferică) mi-am procurat o prismă triunghiulară de sticlă, pentru a încerca să produc cu ea vestitul fenomen al culorilor. În scopul acesta, după ce am făcut întuneric în cameră şi am făcut o mică gaură în stor, ca să pot lăsa să intre o cantitate convenabilă de lumină a Soarelui, am aşezat prisma la

intrarea luminii, astfel, ca ea să apară refractată pe peretele opus. A fost pentru mine, la început, o distracţie plăcută să privesc culorile vii şi intense astfel produse".

Lumina Soarelui este „albă". După ce a trecut printr-o prismă, ea arată toate culorile care există în lumea vizibilă. Natura însăşi reproduce acest rezultat în frumoasa gamă de culori a curcubeului. Încercările de a explica acest fenomen sînt foarte vechi. Povestea biblică potrivit căreia curcubeul ar fi semnul unui legămînt încheiat de Dumnezeu cu oamenii este, într-un sens, o „teorie". Ea nu explică însă satisfăcător de ce curcubeul reapare din timp în timp şi de ce întotdeauna în legătură cu ploaia. Întreaga enigmă a culorii a fost atacată ştiinţific pentru prima oară şi soluţia ei schiţată în marea operă a lui Newton.

O margine a curcubeului este întotdeauna roşie, iar cealaltă violetă. Între ele sînt aşezate toate celelalte culori. Newton explică acest fenomen astfel : fiecare culoare este prezentă în lumina albă. Ele toate străbat împreunate spaţiul interplanetar şi atmosfera, dînd, laolaltă, impresia de lumină albă. Lumina albă este, ca să zicem aşa, un amestec de corpuscule de diferite specii aparţinînd diferitelor culori. În cazul experienţei lui Newton, prisma le separă în spaţiu. Potrivit teoriei mecaniciste, refracţia este datorită unor forţe care acţionează asupra particulelor de lumină, forţe izvorîte din particulele sticlei. Aceste forţe au intensităţi diferite pentru corpusculele corespunzînd la culori diferite, intensitatea lor fiind cea mai mare pentru violet şi cea mai mică pentru roşu. Ca atare, fiecare culoare va fi refractată pe alt drum realizîndu-se astfel separarea ei de celelalte cînd lumina a părăsit prisma. În cazul curcubeului, rolul prismei îl joacă picăturile de apă.

Teoria după care lumina este o substanţă e acum mai complicată decît înainte. În locul unei singure substanţe luminoase avem multe, fiecare corespunzînd altei culori. Însă dacă teoria cuprinde o parte de adevăr, atunci consecinţele ei trebuie să concorde cu observaţiile.

Succesiunea culorilor în lumina albă, aşa cum a fost ea pusă în evidenţă de experienţa lui Newton, se numeşte

spectrul Soarelui sau, mai precis, *spectrul vizibil* al Soarelui. Descompunerea luminii albe în componentele ei, cum s-a arătat mai sus, se numeşte *dispersia* luminii. Culorile separate ale spectrului ar trebui să poată fi reunite din nou de o a doua prismă aşezată în mod convenabil ; în caz contrar explicaţia dată este necorectă.

Procesul trebuie să fie exact inversul precedentului. Trebuie să obţinem lumina albă din culorile separate mai înainte. Newton a arătat prin experienţe că, în adevăr, este posibil să obţinem în modul acesta simplu lumina albă din spectrul ei şi spectrul din lumina albă, ori de cîte ori dorim. Aceste experienţe au constituit un sprijin puternic pentru teoria potrivit căreia corpusculele corespunzătoare fiecărei culori se comportă ca substanţe invariabile. Newton scria :

„...aceste culori nu sînt generate din nou, ci numai scoase în evidenţă prin despărţirea lor ; căci dacă sînt, din nou, complet amestecate şi contopite, ele recompun culoarea pe care o alcătuiau înaintea despărţirii. Şi, pentru acelaşi motiv, transmutările produse prin reunirea diverselor culori nu sînt reale, căci dacă diferitele raze sînt descompuse din nou, apar exact aceleaşi culori, ca înainte de compunere, după cum o pulbere albastră şi una galbenă, amestecate intim, dau impresia de verde cînd sînt privite cu ochiul liber, deşi culorile corpusculelor care le compun nu sînt transmutate cu adevărat, ci numai amestecate. Căci, privite printr-un microscop bun, ele apar ca şi înainte într-un albastru împestriţat cu galben".

Să presupunem că am izolat o fîşie foarte îngustă a spectrului. Aceasta înseamnă că din multele culori am lăsat să treacă printr-o fantă numai una, celelalte fiind oprite de un ecran. Fasciculul care trece este constituit din lumină *omogenă*, adică lumină care nu mai poate fi separată în componente. Aceasta este o consecinţă a teoriei şi poate fi lesne confirmată experimental. Un astfel de fascicul de o singură culoare nu poate fi descompus mai departe prin nici un mijloc. Există procedee foarte simple de obţinere a izvoarelor de lumină omogenă. De exemplu, sodiul incandescent emite lumină omogenă galbenă. Deseori este foarte convenabil să efectuăm anumite experienţe optice cu lumină omogenă, întrucît, cum este uşor de înţeles, rezultatul va fi mult mai simplu.

Să ne închipuim că dintr-o dată s-ar întîmpla un lucru foarte ciudat : Soarele nostru ar începe să emită numai lumină omogenă de o anumită culoare, să zicem galbenă. Numai decît marea varietate a culorilor de pe Pămînt ar dispare. Toate obiectele ar fi ori galbene, ori negre. Această prezicere este o consecinţă a teoriei luminii ca substanţă, potrivit căreia nu pot fi create culori noi. Exactitatea acestei preziceri este confirmată de experienţă : într-o încăpere în care singurul izvor de lumină este sodiul incandescent, orice obiect este fie galben, fie negru. Bogăţia de culori din lume oglindeşte varietatea de culori din care se compune lumina albă.

Teoria care consideră lumina ca o substanţă pare a se verifica strălucit în toate aceste cazuri, deşi necesitatea introducerii atîtor substanţe cîte culori există, are ceva neplăcut. Ipoteza că toate corpusculele de lumină au exact aceeaşi viteză în vid, pare de asemenea foarte artificială.

Ne putem închipui că şi un alt sistem de ipoteze (o teorie cu un caracter cu totul diferit) va putea da rezultate tot atît de bune, furnizînd toate explicaţiile cerute. În fapt, vom asista, în curînd, la ascensiunea altei teorii, care, deşi bazată pe idei cu totul diferite, va explica totuşi acelaşi domeniu al fenomenelor optice. Înainte de a formula presupunerile pe care se sprijină această nouă teorie, trebuie să răspundem la o întrebare, care nu are nici o legătură cu aceste consideraţii optice. Trebuie să ne întoarcem la mecanică şi să întrebăm :

§ 17. CE ESTE O UNDĂ ?

O ştire difuzată, de exemplu, la Washington ajunge foarte repede la New York, chiar dacă nici una din persoanele care iau parte la răspîndirea ei nu s-a deplasat dintr-un oraş în celălalt. Avem de a face aici cu două mişcări absolut distincte : aceea a ştirei (ce pleacă) de la Washington la New York pe de o parte şi aceea a persoanelor care-o răspîndesc pe de altă parte. Vîntul trecînd printr-un lan de grîu dă naştere unei unde care se răspîndeşte pe tot cuprinsul lanului. Din nou trebuie să facem distincţie între mişcarea undei şi mişcarea fiecărui

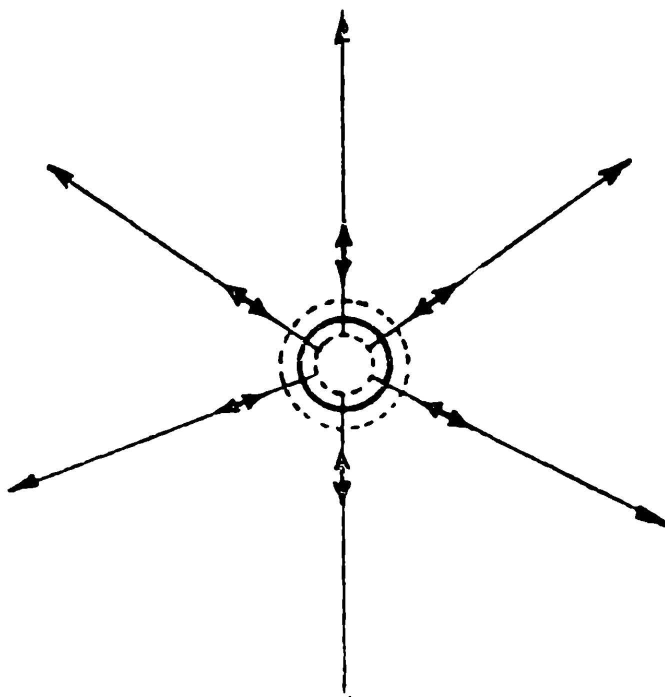
spic în parte, care execută doar mici oscilaţii. Fiecare dintre noi am văzut undele care aleargă în cercuri tot mai mari cînd se aruncă o piatră într-un lac. Mişcarea undei este foarte diferită de aceea a particulelor de apă. Particulele se mărginesc să salte în sus şi în jos. Mişcarea observată a undei este numai propagarea unei stări a materiei, nu mişcarea materiei însăşi. Un dop de plută care pluteşte pe lac ilustrează foarte limpede faptul acesta, deoarece el saltă în sus şi în jos, imitînd mişcarea reală a apei, fără să fie dus de către undă.

Pentru a înţelege mai bine mecanismul formării undei să ne referim tot la o experienţă idealizată. Să presupunem că un spaţiu mare este umplut uniform cu apă, aer sau un alt „mediu". Cam în centrul vasului este o sferă. La începerea experienţei totul este nemişcat. Brusc, sfera începe să „respire" ritmic, dilatîndu-şi şi contractîndu-şi volumul, dar păstrînd forma sferică. Ce se întîmplă în mediu ? Să începem observaţia în momentul cînd sfera începe să se umfle. Particulele mediului din imediata vecinătate a sferei sînt împinse în lături astfel că densitatea stratului de apă sau aer, după caz, va creşte faţă de valoarea ei normală. Asemănător, cînd sfera se strînge, densitatea mediului în imediata sa vecinătate va descreşte. Aceste variaţii ale densităţii se propagă în întregul mediu. Particulele care alcătuiesc mediul execută numai mici oscilaţii, dar mişcarea de ansamblu este o undă progresivă. Elementul nou, esenţial, este aici faptul că pentru prima oară avem de a face cu mişcarea a ceva ce nu este materie, ci energie care se propagă străbătînd materia.

Folosindu-ne de exemplul sferei care pulsează putem introduce două noţiuni fizice generale, importante pentru caracterizarea undelor. Prima este viteza cu care se răspîndesc undele. Ea depinde de mediu, prin urmare este diferită pentru apă şi aer de exemplu. A doua noţiune este *lungimea de undă*. În cazul undelor mării sau rîurilor, ea este distanţa dintre valea unei unde şi valea undei următoare sau dintre crestele a două unde consecutive. Astfel, valurile (undele) mării au lungimea de undă mai mare decît valurile (undele) rîurilor. În cazul undelor noastre, produse de către sfera care pulsează, lungimea de undă

este distanţa, la un moment dat, dintre două straturi sferice consecutive, care prezintă un maximum sau minimum de densitate. Este evident că această distanţă nu depinde numai de mediu. Ritmul pulsaţiei sferei va avea, de bună seamă, o influenţă hotărîtoare, lungimea de undă micşorîndu-se dacă pulsarea se iuţeşte şi mărindu-se, dacă ea devine mai rară.

Acest concept de undă s-a dovedit plin de succes în fizică. El este prin excelenţă un concept mecanicist. Fenomenul este redus la mişcarea particulelor care, conform cu teoria cinetică, sînt constituienţii materiei. Deci, orice teorie care foloseşte conceptul de undă poate fi privită, în general, ca o teorie mecanicistă. De exemplu, explicarea fenomenelor acustice se bazează esenţial pe acest concept. Corpurile care vibrează ca, de exemplu, coardele vocale sau strunele viorii sînt izvoare de unde sonore care se propagă prin aer în modul expus în exemplul cu sfera care pulsa. Astfel, este posibil să reducem toate fenomenele acustice la fenomene mecanice, prin noţiunea de undă.


Fig. 37

S-a accentuat că trebuie să facem o deosebire între mişcarea particulelor şi mişcarea undei însăşi, care este o stare a mediului. Cele două mişcări sînt foarte diferite, dar în exemplul sferei care pulsa este evident că ele se desfăşură, amîndouă, în lungul aceleiaşi drepte. Particulele mediului oscilează de-a lungul unor segmente scurte şi densitatea creşte şi descreşte periodic în ritmul acestei mişcări. Direcţia în care se propagă unda coincide cu dreapta în lungul căreia au loc oscilaţiile. (fig. 37). Tipul acesta de unde poartă numele de unde *longitudinale*. Este

însă acesta singurul fel de unde ? Este important, pentru considerațiile care vor urma, să ne dăm seama că pot exista şi altfel de unde, numite unde *transversale*.

Să modificăm puţin exemplul de mai sus. Avem tot o sferă dar să o presupunem cufundată într-un mediu de altă natură, un soi de gelatină, în loc de aer sau apă. Să mai presupunem că de astădată sfera nu pulsează, ci execută mici rotaţii : întîi într-un sens, apoi îndărăt, mereu în acelaşi ritm şi în jurul unei axe fixe. Gelatina aderă la sferă ; ca urmare, porţiunile aderente sînt nevoite să imite mişcarea sferei. Acestea, la rîndul lor, silesc pe cele situate puţin mai departe să imite aceeaşi mişcare şi aşa mai departe, astfel că în mediu se porneşte o undă. Dacă ne gîndim la deosebirea dintre mişcarea mediului şi mişcarea undei, vedem că aici ele nu se află amîndouă pe aceeaşi direcţie.

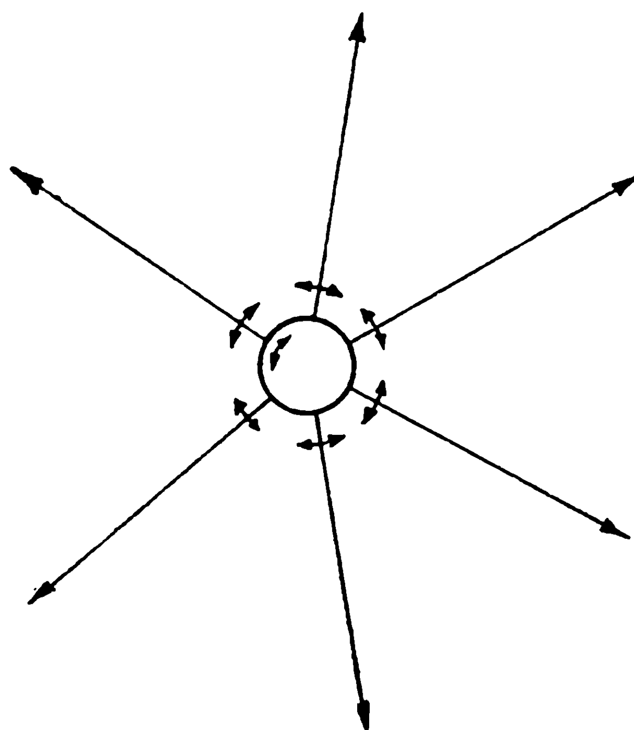


Fig. 38

Unda se propagă în direcţia razei sferei, în timp ce porţiunile mediului se mişcă perpendicular pe această direcţie. A luat naştere astfel o undă transversală (fig. 38).

Undele care se răspîndesc pe suprafaţa apei sînt transversale. O bucăţică de plută saltă numai în sus şi în jos, în vreme ce unda se propagă într-un plan orizontal. Undele sonore în schimb ne furnizează exemplul cel mai familiar de unde longitudinale.

Încă o observaţie : unda produsă de o sferă care pulsează sau oscilează într-un mediu omogen este o *undă sferică*. Ea se numeşte astfel deoarece la un moment dat toate punctele situate pe oricare sferă cu centrul în sursă se comportă la fel. Să considerăm o porţiune dintr-o astfel de sferă, situată la mare depărtare de izvor. Cu cît porţiunea este mai îndepărtată şi mai mică, cu atît poate

fi mai bine asimilată cu un plan (fig. 39). Putem vedea, fără a încerca să fim prea riguroși, că nu este o diferență esențială între o porțiune a unui plan și o parte din suprafața unei sfere cu raza destul de mare. Foarte des vorbim de porțiuni mici ale unei unde sferice foarte depărtate de izvor, ca despre *unde plane*. Cu cît porțiu-

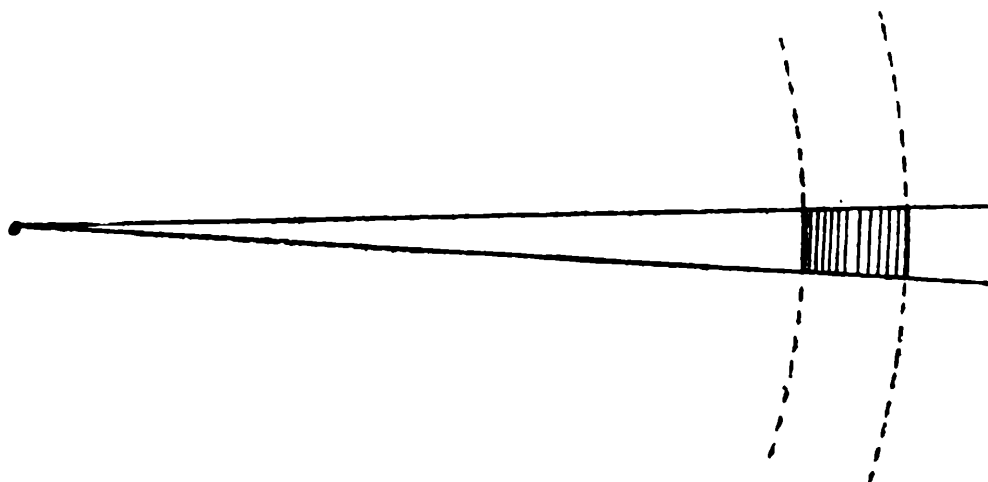


Fig. 39

nea hașurată din schița noastră este situată mai departe de centrul sferei și cu cît unghiul format de către cele două raze este mai mic, cu atît reprezentarea aceasta a unei unde plane este mai bună. Conceptul de undă plană, ca multe alte concepte fizice, nu este decît o ficțiune, care poate fi realizată numai cu un anumit grad de aproximație. Totuși, noțiunea aceasta este utilă și ne va fi necesară mai departe.

§ 18. TEORIA ONDULATORIE A LUMINII

Să ne amintim de ce am întrerupt descrierea fenomenelor optice. Scopul nostru era să introducem o nouă teorie a luminii, diferită de acea corpusculară, care-și propune să explice, de asemenea, același domeniu de fapte. Pentru aceasta a fost nevoie să întrerupem povestirea și să introducem noțiunea de „undă". Acum putem să ne întoarcem la subiectul nostru.

Huygens, un contemporan al lui Newton, a fost acela care a promovat o teorie cu totul nouă. În tratatul său despre lumină, el scrie :

„Dacă, în afară de aceasta, lumina are nevoie de timp pentru propagare — ceea ce vom cerceta numaidecît — urmează că mișcarea aceasta, imprimată materiei în cauză, este o mișcare din aproape în aproape ; prin urmare, ea se propagă ca și sunetul prin suprafețe și unde sferice, căci le numesc unde din cauza asemănării lor cu cele care se formează în apa în care aruncăm o piatră și care se răspîndesc sub formă de cercuri care se nasc unul după altul, numai că ele apar din altă cauză și sînt situate numai pe un strat subțire, la suprafață".

După Huygens lumina este o undă, o transmisie de energie și nu de substanță. Am văzut că teoria corpusculară explică multe din faptele observate. Teoria ondulatorie este și ea capabilă de aceasta? Trebuie să repetăm întrebările cărora le dăduse un răspuns teoria corpusculară pentru a vedea dacă teoria ondulatorie poate să răspundă tot atît de bine. Vom face aceasta sub forma unui dialog între *N*, un adept al teoriei corpusculare a lui Newton, și *H*, un adept al teoriei lui Huygens. Nici unuia din ei nu-i este îngăduit să folosească argumente posterioare operei celor doi mari maeștri.

N : În teoria corpusculară viteza luminii are o semnificație foarte bine definită. Este viteza cu care corpusculele străbat vidul. Ce reprezintă ea în teoria ondulatorie?

H : Ea reprezintă, bineînțeles, viteza undei de lumină. Orice undă cunoscută se propagă cu o viteză bine definită ; și la fel face o undă de lumină.

N : Nu este chiar atît de simplu, cum pare. Undele sonore se propagă în aer, valurile mării în apă. Fiecare undă are nevoie de un mediu material prin care să călătorească. Lumina însă trece prin vid, ceea ce sunetul nu poate. A ne închipui o undă în vid, înseamnă a nu realiza în fond nici o undă.

H: Este drept, aceasta e o dificultate care nu este însă nouă pentru mine. Maestrul meu a reflectat mult asupra acestei chestiuni și a ajuns la concluzia că singura ieșire din impas este să presupunem existența unei substanțe ipotetice, *eterul*, un mediu transparent, care îmbibă întregul Univers. Universul, ca să zicem așa, înoată în eter. De îndată ce am avut îndrăzneala să introducem această noțiune, totul devine limpede și plauzibil.

N : Protestez împotriva unei atari presupuneri. În primul rînd ea introduce o nouă substanță ipotetică și de pe acum avem prea multe substanțe în fizică. Dar mai este o obiecție împotriva ei. Sînteți fără îndoială convins că trebuie să explicăm orice fenomen prin procese mecanice. Or, cum se împacă aceasta cu eterul? Puteți să răspundeți la întrebarea simplă cum este alcătuit eterul din particule elementare și cum își manifestă el existența în alte fenomene?

H : Prima obiecție este desigur întemeiată, însă introducînd noțiunea, cam artificială, de eter lipsit de greutate, am scăpat dintr-o dată de noțiunea mult mai artificială de corpuscul de lumină. Avem de a face numai cu o singură substanță „misterioasă" în locul unui număr infinit de substanțe, corespunzînd numărului mare de culori din spectru. Nu considerați acest lucru un progres real? Cel puțin, am concentrat toate dificultățile într-un singur punct. Nu mai avem nevoie de presupunerea artificială că particule care corespund la diferite culori străbat vidul cu aceeași viteză. Al doilea argument este de asemenea întemeiat. Nu putem da o explicație mecanică eterului. Dar nu încape îndoială că studiul viitor al opticii, și poate și alte fenomene, vor dezvălui structura lui. Deocamdată trebuie să așteptăm noi experiențe și deducții, dar sper că în cele din urmă vom reuși să lămurim problema structurii mecanice a eterului.

N : Să părăsim deocamdată chestiunea, deoarece tot nu o putem încă definitiva. Aș dori să știu cum explică teoria dumneavoastră, chiar lăsînd la o parte dificultățile, acele fenomene care sînt atît de clare și lesne de înțeles în lumina teoriei corpusculare. Să examinăm, de pildă, faptul că razele de lumină se propagă în linie dreaptă *în vid* sau în aer. O bucată de hîrtie așezată înaintea unei lumînări aruncă pe perete o umbră distinctă și net conturată. Dacă teoria ondulatorie ar fi adevărată, atunci nu s-ar putea forma umbre nete, căci undele ar trebui să se încovoaie pe muchia hîrtiei, dînd o umbră neprecis conturată pe perete. Știți doar că o barcă mică nu constituie un obstacol pentru valurile mării; ele o ocolesc pur și simplu, fără a arunca vreo umbră.

H : Acesta nu este un argument convingător. Să ne

gîndim la niște valuri mărunte de rîu, care izbesc un vapor din coastă. Valurile care iau naștere de o parte a vasului nu apar în partea cealaltă. Dacă undele sînt destul de mici și vasul destul de mare, atunci în spatele vasului apare o umbră foarte distinctă. Este foarte probabil că lumina dă impresia că se propagă în linie dreaptă, numai din cauză că lungimea ei de undă este foarte mică în comparație cu mărimea obstacolelor și a orificiilor folosite în mod obișnuit în experiențe. Poate că dacă am putea construi un ecran destul de mic, umbra nu s-ar mai forma de loc. S-ar putea să întîmpinăm mari greutăți la construirea unui aparat cu care să se poată stabili dacă lumina este sau nu capabilă să ocolească obstacolele. În schimb, dacă o asemenea experiență ar putea fi imaginată, ea ar fi crucială pentru teoria ondulatorie și teoria corpusculară a luminii.

N: S-ar putea ca teoria ondulatorie să conducă la fapte noi în viitor, dar nu am cunoștință de nici un fel de date experimentale care ar putea să o confirme în mod convingător în stadiul actual. Cîtă vreme nu este dovedit experimental, în mod precis, că lumina poate ocoli obstacolele, nu văd nici o rațiune pentru a nu continua să cred în teoria corpusculară care îmi pare mai simplă și deci mai bună decît teoria ondulatorie.

Aici putem întrerupe dialogul, cu toate că tema nu este cîtuși de puțin epuizată.

Rămîne de arătat cum explică teoria ondulatorie refracția razelor și varietatea culorilor. După cum știm, teoria corpusculară este capabilă să facă aceasta. Vom începe cu refracția, dar va fi util să considerăm mai întîi un exemplu, care nu are nimic de a face cu optica.

Într-un spațiu deschis, mare, înaintează doi oameni, ținînd fiecare un capăt al unei prăjini rigide. La început, ei merg drept înainte, amîndoi cu aceeași viteză. Cîtă vreme vitezele lor rămîn aceleași, fie ele mari sau mici, prăjina va suferi numai deplasări paralele, adică nici nu se va roti, nici nu-și va schimba direcția. Toate pozițiile succesive ale prăjinii vor fi paralele între ele. Dar, să presupunem acum că un răstimp, care poate fi scurt cît o fracțiune de secundă, oamenii nu merg la fel de repede. Ce se va întîmpla? Este limpede că în intervalul acesta,

prăjina se va roti astfel că nu se va mai deplasa paralel cu poziția ei inițială. După ce vitezele vor fi redevenit egale, direcția de înaintare va fi diferită de cea de la început (fig. 40). Aceasta se vede clar în figură. Schimbarea direcției s-a produs în intervalul de timp în care vitezele celor două persoane fuseseră diferite.

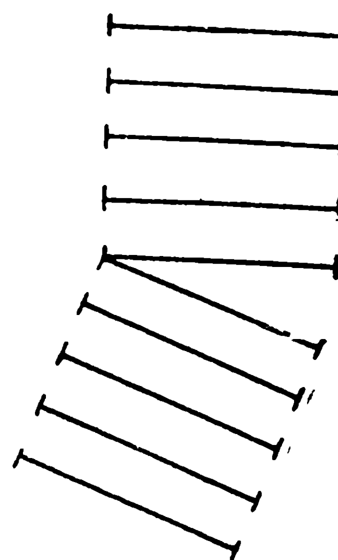


Fig. 40

Exemplul acesta ne permite să înțelegem refracția unei unde. Să considerăm o undă plană, care străbate eterul căzînd apoi pe o placă de sticlă. Figura următoare (fig. 41) ne arată o undă care înaintează pe un front relativ larg. Frontul de undă este un plan de-a lungul căruia toate părțile eterului se comportă exact la fel într-un moment dat. Cum viteza depinde de mediul prin care trece lumina, în sticlă ea va fi alta decît în vid. În intervalul de timp foarte scurt, în care frontul undei pătrunde în sticlă, regiuni diferite ale lui vor avea viteze diferite. Este limpede că porțiunea care a ajuns la sticlă va merge mai departe cu viteza luminii în sticlă, în timp ce celelalte părți ale undei își vor continua drumul cu viteza luminii în eter. Din cauza existenței acestei diferențe de viteză în lungul frontului de undă în timpul cît unda „pătrunde" în sticlă, direcția ei se schimbă.

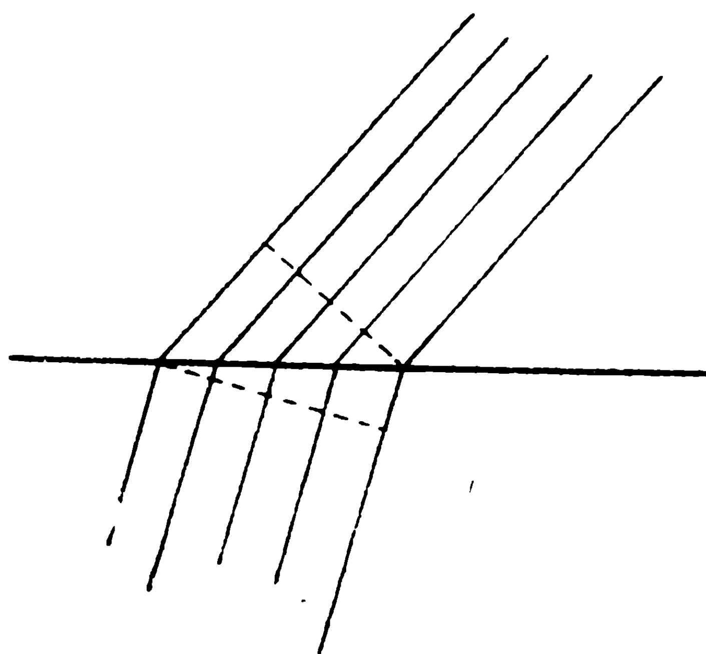


Fig. 41

Vedem deci că nu numai teoria corpusculară, ci și teoria ondulatorie conduce la o explicare a refracției.

Consideraţii suplimentare, împreună cu puţină matematică, arată că explicaţia teoriei ondulatorii este mai simplă şi mai bună şi că toate consecinţele ei sînt în deplină concordanţă cu observaţiile. În adevăr, metode cantitative de raţionament ne dau posibilitatea să deducem viteza luminii într-un mediu refringent, dacă ştim cum se refractă raza cînd pătrunde în el. Măsuri directe confirmă, într-un mod strălucit, aceste prevederi şi, prin urmare, însăşi teoria ondulatorie a luminii.

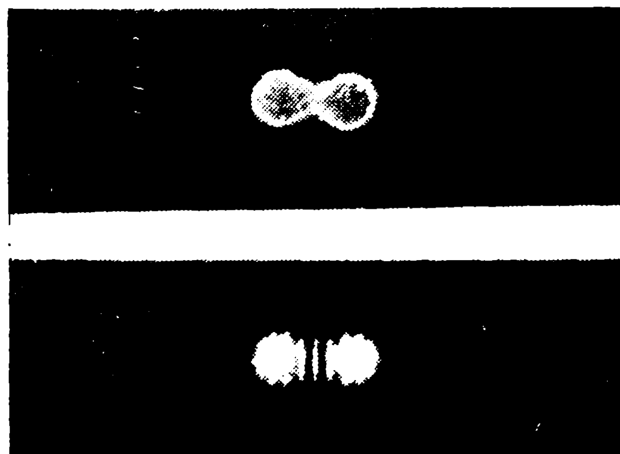
Mai rămîne problema culorii.

Trebuie să amintim că o undă este caracterizată prin două numere, viteza ei şi lungimea ei de undă. Ipoteza esenţială a teoriei ondulatorii a luminii este că *unor culori diferite, le corespund lunigimi de undă diferite*. Lungimea de undă a culorii omogene galbene este alta decît cea a roşului sau a violetului. În locul diferenţierii artificiale a corpusculelor după culoarea căreia îi aparţin, avem diferenţa firească a lungimilor de undă.

Urmează că, pentru a descrie experienţele lui Newton asupra dispersiei luminii, se pot adopta două limbaje diferite, limbajul teoriei corpusculare şi cel al teoriei ondulatorii. De exemplu :

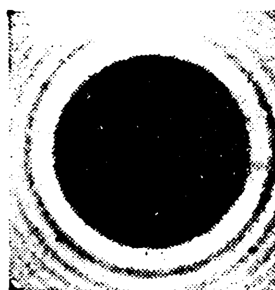
Limbajul corpuscular	Limbajul ondulator
Corpusculele care aparţin unor culori diferite au aceeaşi viteză *în vid*, dar viteze diferite în sticlă.	Razele cu lungimi de undă diferite, caracterizînd culori diferite, au aceeaşi viteză în eter, dar viteze diferite în sticlă.
Lumina albă este un amestec de corpuscule aparţinînd unor culori diferite, care sînt însă separate în spectru.	Lumina albă este o suprapunere de unde de toate lungimile de undă, care în spectru sînt totuşi separate.

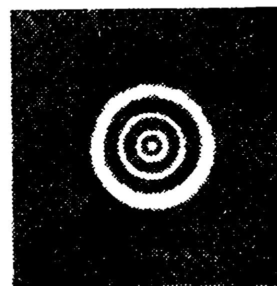
Ar fi de dorit să evităm ambiguitatea care decurge din existenţa a două teorii distincte asupra aceloraşi fenomene, optînd în favoarea uneia sau alteia, după o analiză atentă a calităţilor şi punctelor slabe ale fiecăreia. Dialogul dintre *N* şi *H* arată însă că aceasta nu este o sarcină uşoară. În stadiul acesta, o hotărîre ar fi mai mult o chestiune de preferinţă decît de convingere ştiinţifică. În timpul lui Newton şi în următorii peste 100 de ani, majoritatea fizicienilor au preferat teoria corpusculară.



(Fotografiate de V. Arkadiev)

Sus se văd două urme luminoase produse de două raze de lumină care trec prin două orificii, succesiv (un orificiu era descoperit şi altul închis şi apoi situaţia se inversa). Jos se văd benzile care apar în urma trecerii razelor de lumină simultan prin cele două fante.





(Fotografiate de Arkadiev V.)

Difracţia luminii în jurul unui mic obstacol,

Difracţia luminii care trece printr-o fantă fină.

Istoria şi-a rostit verdictul ei în favoarea teoriei ondulatorii şi împotriva teoriei corpusculare, mult mai tîrziu, abia către mijlocul secolului al nouăsprezecelea. În discuţia sa cu *H, N* afirmase că, în principiu, este posibil să se decidă pe cale experimentală între cele două teorii. Teoria corpusculară nu permite luminii să ocolească obstacolele şi cere ca umbrele să fie nete. Dimpotrivă, conform teoriei ondulatorii, un obstacol destul de mic ar trebui să nu arunce de loc umbră. În lucrările lui Young şi Fresnel acest rezultat a fost obţinut experimental şi s-au tras concluziile teoretice corespunzătoare.

Am discutat mai înainte o experienţă foarte simplă, în care se punea în calea luminii emise de o sursă punctiformă un ecran prevăzut cu un orificiu, formîndu-se o umbră pe perete. Să simplificăm şi mai mult această experienţă, presupunînd că sursa emite lumină omogenă, Pentru a obţine rezultate cît mai bune, sursa trebuie să fie intensă. Să micşorăm din ce în ce orificiul ecranului. Dacă folosim o sursă puternică şi reuşim să facem deschiderea destul de mică, apare un fenomen nou şi surprinzător, absolut de neînteles din punctul de vedere al teoriei corpusculare : nu mai apare distincţia precisă dintre lumină şi întuneric. Lumina se pierde treptat în fondul întunecat sub forma unui şir de inele luminoase şi întunecate. Formarea inelelor este foarte caracteristică pentru teoria ondulatorie. Explicarea zonelor alternativ luminoase şi întunecate devine foarte clară dacă schimbăm puţin condiţiile experienţei. Să presupunem că avem o foaie de hîrtie neagră cu două înţepături de ac, prin care trece lumina. Dacă găurelele sînt foarte apropiate şi foarte mici, şi izvorul de lumină omogenă este destul de puternic, pe perete vor apărea multe dungi, alternativ luminoase şi întunecate, care se pierd treptat în fondul întunecat de o parte şi de alta a cîmpului. Explicaţia este simplă. O dungă întunecată apare unde valea unei unde izvorîtă dintr-o gaură se suprapune peste creasta unei unde izvorîtă din cealaltă gaură, astfel încît cele două unde se sting reciproc. O dungă luminoasă apare unde valea undei izvorîtă dintr-o gaură se suprapune peste valea undei provenită din cealaltă gaură, sau creasta unei

unde peste creasta celeilalte, astfel că cele două unde se întăresc una pe alta. Explicația este mai complicată în cazul inelelor întunecate și luminoase din exemplul precedent, în care am folosit un ecran cu un singur orificiu; principiul este însă același. Să reținem formarea dungilor întunecate și luminoase în cazul a două găuri mici și a inelelor luminoase și întunecate în cazul unei singure găuri, deoarece vom reveni asupra lor mai tîrziu. Experiențele descrise mai sus demonstrează *difracția* luminii, adică abaterea ei de la propagarea rectilinie, abatere care se produce cînd în calea undei de lumină se interpun deschideri sau obstacole mici.

Cu puțină matematică putem merge mult mai departe. Putem stabili cît de mare, sau mai bine zis, cît de mică trebuie să fie lungimea de undă pentru ca să se formeze o figură anumită. Prin urmare, pe calea aceasta, experiențele permit să măsurăm lungimea de undă a luminii omogene folosită ca sursă. Pentru a da o idee de micimea lungimilor de undă, vom cita două valori reprezentînd lungimile de undă ale extremităților spectrului solar, adică ale luminii roșii și violete.

Lungimea de undă a luminii roșii este de 0,000 08 cm.

Lungimea de undă a luminii violete este de 0,000 04 cm.

Nu este cazul să rămînem uimiți de micimea acestor numere. Fenomenul de umbră netă, adică fenomenul propagării rectilinii a luminii, se observă în natură tocmai din cauză că toate deschiderile și obstacolele cu care avem de-a face în mod obișnuit sînt extrem de mari față de lungimile de undă ale luminii. Numai cînd intervin obstacole sau deschideri foarte mici, lumina își manifestă natura sa ondulatorie.

Dar povestirea căutării unei teorii a luminii nu este nicidecum sfîrșită. Verdictul secolului al nouăsprezecelea nu a fost nici definitiv nici ultimul. Fizicianului modern i se prezintă din nou întreaga problemă a alegerii între corpuscule și unde, de data aceasta sub o formă mult mai adîncă și mai complicată. Să acceptăm deocamdată înfrîngerea teoriei corpusculare a luminii, pînă cînd ne vom da seamă cît de problematică este victoria teoriei ondulatorii.

§ 19. UNDELE DE LUMINĂ SÎNT LONGITUDINALE SAU TRANSVERSALE ?

Toate fenomenele optice pe care le-am considerat pledează pentru teoria ondulatorie a luminii. Ocolirea obstacolelor de către lumină și explicarea refracției sînt cele mai puternice argumente în favoarea ei. Dacă ne lăsăm călăuziți de punctul de vedere mecanicist, vom constata că a rămas o chestiune deschisă : precizarea proprietăților mecanice ale eterului. Pentru rezolvarea acestei probleme este esențial să știm dacă undele de lumină care se propagă în eter sînt longitudinale sau transversale. Cu alte cuvinte : lumina se propagă ca sunetul? Adică unda este datorită variației densității mediului, oscilațiile particulelor făcîndu-se deci pe direcția de propagare? Sau eterul se aseamănă cu o gelatină elastică, un mediu în care se pot propaga numai unde transversale și ale cărui particule se mișcă perpendicular pe direcția în care înaintează unda însăși?

Înainte de a rezolva această problemă să stabilim care este răspunsul ce ne-ar conveni mai mult. Bineînțeles, am fi încîntați dacă undele de lumină ar fi longitudinale. Dificultățile întîmpinate la descrierea modelului mecanic al eterului ar fi mult mai mici în acest caz. Imaginea pe care ne-am face-o despre eter ar fi foarte probabil în genul modelului mecanic al unui gaz, model care explică propagarea sunetului. Mult mai dificilă ar fi imaginea unui eter capabil să transmită unde transversale. Nu este lucru ușor să ne reprezentăm o gelatină în chip de mediu constituit din particule, în așa fel încît prin intermediul lui să se poată propaga unde tranversale. Huygens credea că eterul se va dovedi a fi de „tipul aerului“, nu de tipul „gelatinei“. Dar naturii puțin îi pasă de ceea ce-i dictăm noi. S-a arătat natura clementă față de fizicienii care au încercat să interpreteze din punctul de vedere mecanic tot ce se întîmplă ? Pentru a răspunde la această întrebare ar trebui să discutăm alte noi experiențe.

Vom considera, mai amănunțit, numai una din numeroasele experiențe care ar putea să ne aducă o lămurire. Să presupunem că avem o placă foarte subțire, tăiată dintr-un cristal de turmalină, într-un mod anumit pe care

nu este necesar să-l descriem aici. Placa nu trebuie să fie atît de subţire, încît să se poată vedea prin ea un izvor luminos. Să luăm două plăci de acestea şi să le interpunem amîndouă între ochi şi sursa de lumină. Ce ne-am aştepta să vedem ? Tot un punct luminos, admiţînd că plăcile sînt destul de subţiri. Sînt multe şanse, ca experienţa să confirme aşteptările noastre. Să nu ne preocupăm de sensul afirmaţiei că există şanse şi să presupunem că vedem în fapt punctul luminos prin ambele cristale. Să schimbăm acum poziţia unuia din cristale, rotindu-l. Această precizare are sens numai dacă poziţia axului de rotaţie este bine definită. Vom alege drept ax linia determinată de raza incidentă. Aceasta înseamnă că se vor deplasa toate punctele cristalului rotit, afară de cele situate pe ax. Se petrece un lucru straniu ! Lumina se stinge din ce în ce, pînă cînd dispare complet. Continuînd să rotim cristalul, ea va reapare şi cînd vom ajunge din nou în poziţia iniţială o vom vedea tot atît de bine ca la început (fig. 42).

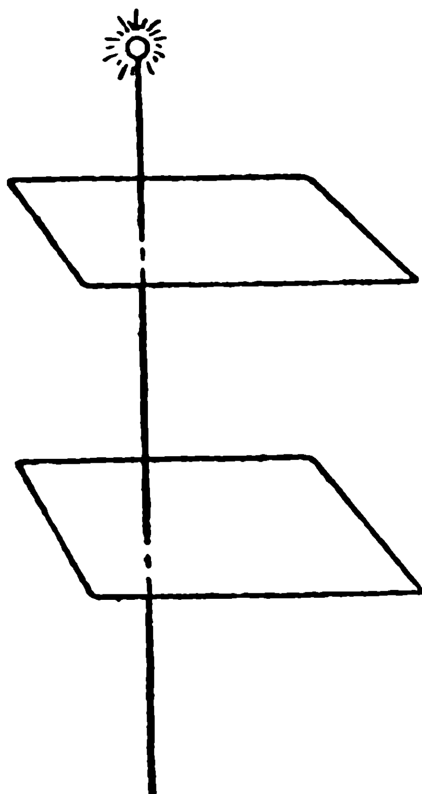


Fig. 42

Fără a intra în amănuntele acestei experienţe şi a altora asemănătoare, ne putem totuşi întreba : se pot explica aceste fenomene dacă undele de lumină sînt longitudinale ? În cazul unor unde longitudinale, particulele eterului s-ar mişca în lungul axei, ca şi raza. Or, prin rotirea cristalului, în lungul axului nu se schimbă nimic. Punctele de pe ax nu se deplasează de loc şi numai în vecinătatea axului au loc deplasări foarte mici. O schimbare atît de radicală ca dispariţia sau reapariţia unei imagini nu s-ar putea produce în cazul unei unde longitudinale. Fenomenul acesta şi multe altele asemănătoare pot fi explicate numai în ipoteza că undele de lumină sînt transversale şi nu longitudinale ! Sau, cu alte cuvinte, trebuie să presupunem că eterul este de tipul „gelatinei“.

Acesta este foarte trist ! Trebuie să fim gata să înfruntăm dificultăți uriașe în încercarea de a descrie, din punct de vedere mecanic, eterul.

§ 20. ETERUL ȘI CONCEPȚIA MECANICISTĂ

Discutarea diferitelor încercări de a interpreta eterul ca mediu care transmite lumina este o poveste lungă. O imagine mecanică implică particule care interacționează cu forțe îndreptate de-a lungul liniilor care le unesc și forțe care depind numai de distanță. Pentru a-și putea imagina eterul ca substanță mecanică „gelatinoidă", fizicienii au fost nevoiți să facă unele presupuneri, extrem de artificiale și nefirești. Nu le vom cita aici ; ele aparțin unui trecut aproape dat uitării. Ele au avut însă o urmare foarte importantă. Necesitatea introducerii atîtor presupuneri cu totul independente una de alta, caracterul lor artificial, au avut drept efect zdruncinarea credinței în punctul de vedere mecanicist.

Dar există și alte obiecții împotriva eterului, mai simple chiar decît însăși dificultatea constituției lui. Din moment ce ne-am propus să explicăm toate fenomenele optice din punctul de vedere mecanic, trebuie să admitem că eterul există pretutindeni. Nu poate exista vid dacă este adevărat că lumina nu se poate propaga decît într-un mediu.

Or, știm din mecanică că spațiul interstelar nu opune rezistență mișcării corpurilor materiale. Planetele, de exemplu, străbat eterul ce se aseamănă cu gelatina, fără a întîmpina vreo rezistență, cum ar fi de așteptat în cazul unui mediu material. Dar dacă eterul nu perturbă mișcarea materiei, înseamnă că nu poate exista o interacțiune între particulele de eter și particulele de materie. De altă parte, lumina trece prin eter, de asemenea prin sticlă și apă, dar viteza ei este diferită în cele două substanțe din urmă. Care ar putea fi justificarea mecanică a acestui fapt ? Evident, numai o interacțiune oarecare între particulele de eter și particulele de materie. Dar am stabilit că în cazul corpurilor care se mișcă liber, trebuie să excludem posibilitatea unei astfel de interacțiuni. Cu alte

cuvinte ar exista o interacțiune între eter și materie în fenomenele optice și nici una în fenomenele mecanice. Aceasta este o concluzie cu totul paradoxală !

S-ar părea că există o singură ieșire din această dilemă. În cadrul încercărilor de a interpreta fenomenele naturii din punctul de vedere mecanicist, a fost necesar în tot cursul dezvolării științei, pînă în pragul secolului al douăzecelea, să se introducă substanțe artificiale, ca fluidul electric și cel magnetic, corpusculele de lumină sau eterul. Rezultatul obținut a fost mai curînd concentrarea tuturor dificultăților în cîteva puncte esențiale, cum a fost eterul, în cazul fenomenelor optice. Toate încercările infructuoase de a ajunge la o reprezentare a eterului într-un mod simplu, precum și alte obiecții, par a arăta că greșeala rezidă în presupunerea fundamentală că toate evenimentele din natură ar putea fi explicate din punctul de vedere mecanicist. Știința nu a reușit să înfăptuiască în întregime, în mod plauzibil, programul mecanicismului și azi nici un fizician nu mai crede în posibilitatea realizării lui.

În scurta noastră trecere în revistă a principalelor idei fizice am întîlnit unele probleme nerezolvate și am întîmpinat dificultăți și obstacole care au descurajat încercările de a formula o interpretare unitară și consecventă a tuturor fenomenelor lumii exterioare. Am întîlnit astfel o cheie neobservată în mecanica clasică, a identității dintre masa gravitațională și masa inertă. Ne-am izbit apoi de caracterul artificial al fluidelor electrice și magnetice. O altă dificultate nerezolvată a fost interacțiunea dintre curentul electric și acul magnetic. Vom aminti că această forță nu acționa în lungul liniei care unea sîrma cu polul magnetic și că depindea de viteza sarcinii în mișcare. Legea care exprima direcția și intensitatea acestei forțe era extrem de complicată. Și, în sfîrșit, am întîmpinat marea dificultate a eterului.

Fizica modernă a atacat toate aceste probleme și le-a rezolvat. Dar, în lupta pentru dobîndirea acestor soluții, s-au născut alte probleme și mai profunde. Cunoștințele noastre sînt cu mult mai vaste și mai profunde decît cele ale fizicianului din secolul al XIX-lea, tot astfel însă și îndoielile și dificultățile noastre.

Rezumăm :

În vechile teorii ale fluidelor electrice, teoriile corpusculare și ondulatorii ale luminii, am încercat să aplicăm punctul de vedere mecanicist. Dar în domeniul fenomenelor electrice și optice am întîlnit grave dificultăți în această aplicare.

O sarcină în mișcare acționează asupra acului magnetic. Dar forța, în loc să depindă numai de distanță, depinde și de viteza sarcinii. Forța nu este nici de respingere nici de atracție, ci acționează perpendicular pe linia care unește acul cu sarcina.

În optică a trebuit să ne decidem în favoarea teoriei ondulatorii și împotriva teoriei corpusculare a luminii. Unda ce se răspîndește într-un mediu constituit din particule între care acționează forțe mecanice este fără îndoială un concept mecanic. Care este însă mediul prin care se propagă lumina și care sînt proprietățile lui mecanice ? Nu există nici o speranță de a reduce fenomenele optice la fenomene mecanice, cîtă vreme nu s-a dat un răspuns la această întrebare. Dar, dificultățile ridicate de rezolvarea acestei probleme sînt atît de mari, încît ne vedem siliți să o părăsim și astfel, totodată, să părăsim și concepțiile mecaniciste.

III. CÎMP, RELATIVITATE

Cîmpul ca reprezentare. — Cei doi stîlpi ai teoriei cîmpului. — Realitatea cîmpului. — Cîmpul şi eterul. — Sistem de referinţă. — Eterul şi mişcarea. — Durată, distanţă, relativitate. — Relativitatea şi mecanica. — Continuumul spaţiu-timp. — Relativitatea generală. — În exteriorul şi în interiorul unui ascensor. — Geometrie şi experienţă. — Relativitatea generală şi verificarea ei. — Cîmp şi materie.

§ 21. CÎMPUL CA REPREZENTARE

În cursul celei de a doua jumătăţi a secolului al XIX-lea s-au introdus în fizică idei noi şi revoluţionare ; ele au deschis calea unei concepţii filosofice noi, diferită de acea mecanicistă. Rezultatele lucrărilor lui Faraday, Maxwell şi Hertz au dat un impuls dezvoltării fizicii moderne, ducînd la crearea unor noţiuni noi din care a rezultat o nouă imagine a realităţii.

Sarcina noastră actuală este să descriem cotitura provocată în ştiinţă de aceste noi concepte şi să arătăm cum au cîştigat treptat în claritate şi rigurozitate. Vom încerca să reconstituim linia progresului în mod logic, fără a ne preocupa prea mult de succesiunea cronologică.

Noile concepte s-au format în legătură cu fenomenele din electricitate, dar este mai simplu să le introducem, mai întîi, prin intermediul mecanicii. Ştim că două particule se atrag şi că forţa de atracţie dintre ele descreşte cu pătratul distanţei. Putem reprezenta acest fapt într-un nou mod, ceea ce vom şi face, deşi este greu să apreciem de la început avantajele lui. Micul cerc din fig. 43 reprezintă un corp atractiv, de exemplu Soarele. În realitate, trebuie să ne imaginăm diagrama noastră ca un model

în spaţiu, nu ca o figură plană. Micul nostru cerc reprezintă prin urmare o sferă în spaţiu, Soarele. Un corp, aşa-numitul *corp de probă,* adus undeva în vecinătatea Soarelui, va fi atras în lungul liniei care uneşte centrul lui cu centrul Soarelui. Liniile din figură indică direcţia forţei de atracţie a Soarelui pentru diferite poziţii ale corpului de probă. Săgeata fiecărei linii arată că forţa este îndreptată spre Soare, ceea ce denotă că ea este de atracţie. Acestea sînt *liniile de forţă ale cîmpului gravitaţional.* Pentru moment, aceasta reprezintă numai o denumire şi nu avem nici o justificare pentru a insista asupra ei. Figura noastră are însă o caracteristică asupra căreia vom reveni mai tîrziu. Liniile de forţă sînt trasate în spaţiul unde nu există materie. Pentru moment, toate liniile de forţă sau, pe scurt, *cîmpul,* indică numai cum s-ar comporta un corp de probă adus în vecinătatea sferei pentru care a fost construit cîmpul.

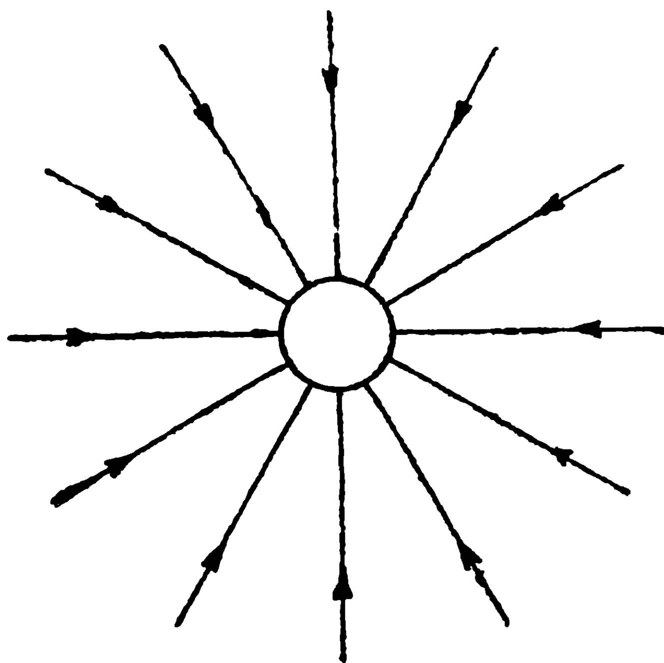


Fig. 43

Liniile din modelul nostru în spaţiu sînt mereu perpendiculare pe suprafaţa sferei. Deoarece ele converg către un singur punct, sînt dese în apropierea sferei şi devin din ce în ce mai rare cu cît ne îndepărtăm de ea. Dacă distanţa de la sferă creşte de două sau de trei ori, densitatea liniilor, în modelul nostru spaţial (dar nu şi în schiţă), va deveni de patru sau de nouă ori mai mică. Prin urmare, liniile de forţă au o dublă funcţiune. De o parte, ele indică direcţia forţei care acţionează asupra unui corp adus în vecinătatea sferei-Soare. De altă parte, prin densitatea lor spaţială, ele ne arată cum variază forţa cu distanţa. Prin urmare, reprezentarea grafică a cîmpului, corect interpretată, indică direcţia forţei gra-

vitaționale precum și dependența ei de distanță. Putem citi legea gravitației dintr-un astfel de desen tot atît de bine ca din descrierea ei în cuvinte sau în limbajul precis și economic al matematicii. *Reprezentarea prin cîmp*, așa cum o vom numi de aici înainte, poate părea clară și interesantă dar nu avem nici o rațiune să considerăm că ea reprezintă un progres real. Ar fi foarte greu să dovedim utilitatea ei în cazul gravitației. Unii vor găsi poate util să vadă în aceste linii mai mult decît un simplu desen presupunînd că acțiunile reale ale forțelor se exercită în lungul lor. S-ar putea admite acest lucru, dar atunci vitezele acțiunilor în lungul liniilor de forță ar trebui presupuse infinit de mari ! Forța dintre două corpuri, potrivit legii lui Newton, depinde numai de distanță ; timpul nu intervine în reprezentare. Forța ar trebui deci să treacă instantaneu de la un corp la celălalt ! Dar, cum mișcarea cu viteză infinită nu poate avea nici o semnificație pentru un om cu judecată normală, încercarea de a face din desenul nostru mai mult decît un model nu duce la nimic.

Nu avem, totuși, intenția să discutăm acum problema gravitației. Cele de mai sus ne-au slujit numai drept introducere, simplificînd explicarea unor metode de raționament similare din teoria electricității.

Vom începe cu discutarea experienței care a creat dificultăți serioase interpretării noastre mecaniciste. Era vorba de un curent care trece printr-un circuit în formă de cerc (printr-o spiră circulară). În mijlocul circuitului era așezat un ac magnetic. În momentul cînd începea să curgă curentul, apărea o forță care acționa asupra polului magnetic, perpendicular pe fiecare linie care unea polul cu sîrma. Cînd această forță era determinată de o sarcină în mișcare, ea depindea de viteza sarcinii, cum a arătat experiența lui Rowland. Aceste fapte experimentale contraziceau concepția filosofică potrivit căreia toate forțele trebuie să acționeze în lungul liniilor care unesc particulele și nu pot depinde decît de distanță.

Expresia exactă a forței pe care o exercită un curent asupra unui pol magnetic este foarte complicată, mult mai complicată decît cea a forței gravitaționale. Să încercăm totuși să ne facem o imagine concretă a acțiunii ca și în

cazul forţei gravitaţionale. Trebuie să răspundem la întrebarea : cu ce forţă acţionează curentul asupra unui pol magnetic situat undeva în vecinătatea lui ? Ar fi destul de anevoios să descriem această forţă în cuvinte. Chiar o formulă matematică ar fi complicată şi greoaie. Este mai bine să reprezentăm tot ce ştim despre forţele care acţio-

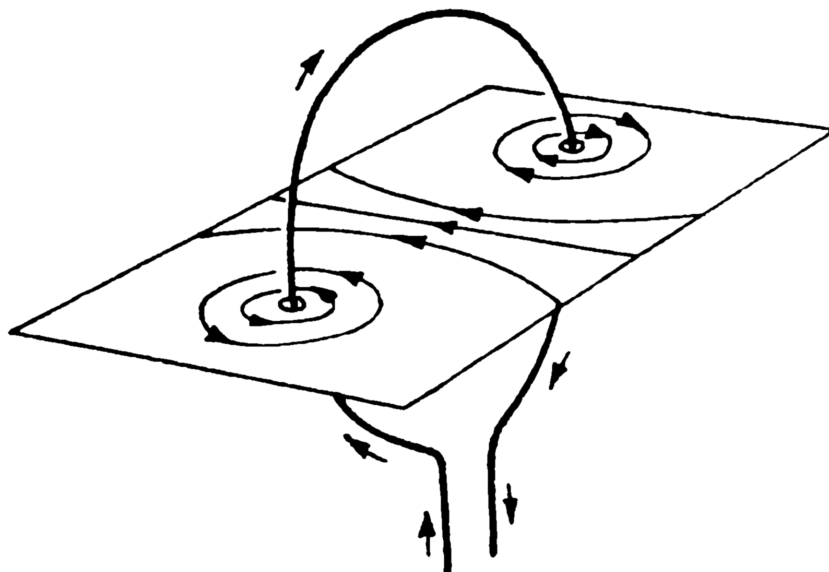


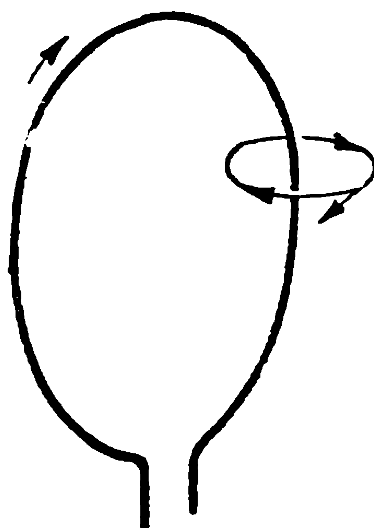
Fig. 44

nează, printr-un desen sau mai degrabă printr-un model spaţial cu linii de forţă. O oarecare dificultate o constituie faptul că un pol magnetic nu există decît legat de alt pol magnetic, formînd amîndoi un dipol. Ne putem totuşi imagina întotdeauna acul magnetic de ajuns de lung ca să nu fie nevoie să ţinem seama decît de forţa care acţionează asupra polului situat mai aproape de curent. Celălalt pol ar fi, în aceste condiţii, destul de departe pentru a se putea neglija forţa care se exercită asupra lui. Pentru a evita ambiguitatea vom conveni că polul magnetic situat mai aproape de sîrmă este cel *pozitiv*.

Caracterul forţei care acţionează asupra polului magnetic pozitiv apare explicit în figura noastră (fig. 44).

Observăm, în primul rînd, mai multe săgeţi lîngă sîrmă, indicînd sensul curentului, de la potenţialul mai înalt către cel mai jos. Celelalte linii sînt toate linii de forţă aparţinînd acestui curent, situate într-un anumit plan. Trasate convenabil, ele ne indică direcţia vectorului-forţă, care reprezintă acţiunea curentului asupra unui pol mag-

netic pozitiv dat, spunîndu-ne totodată și ceva despre lungimea acestui vector. Forța, după cum știm, este un vector și pentru a o determina trebuie să-i cunoaștem atît orientarea cît și lungimea. Ne vom ocupa, în special, cu problema direcției forței care acționează asupra unui pol. Întrebarea noastră este : cum putem găsi, din reprezentare, direcția forței în fiecare punct al spațiului ?


Fig. 45

Regula pentru aflarea direcției forței cu ajutorul unui asemenea model nu este tot atît de simplă ca în exemplul nostru precedent, în care liniile de forță erau drepte. În diagrama următoare este trasată numai o singură linie de forță pentru a lămuri procedeul (fig. 45). Vectorul-forță este situat în lungul tangentei la linia de forță, cum se arată în schiță. Săgeata vectorului-forță și săgețile liniei de forță sînt îndreptate în aceeași direcție. Aceasta este deci direcția în care acționează forța asupra unui pol magnetic în acest punct. Un desen bun sau, mai curînd, un model bun ne spune ceva și despre lungimea vectorului-forță, în fiecare punct. Acest vector trebuie să fie mai lung unde liniile sînt mai dese, adică aproape de sîrmă, și mai scurt unde liniile sînt mai rare, adică departe de sîrmă.

În felul acesta liniile de forță, sau, cu alte cuvinte, cîmpul ne dă posibilitatea să determinăm forța care acționează asupra unui pol magnetic în fiecare punct al spațiului. Pentru moment, aceasta este singura justificare a construcției noastre îngrijite a cîmpului. Știind acum ce exprimă cîmpul, vom examina cu mult mai mult interes liniile de forță care corespund curentului. Ele sînt cercuri care înconjură sîrma și sînt situate în plane perpendiculare pe cel al sîrmei. Caracterul forței, cum rezultă din figură, ne duce, de asemenea, la concluzia că forța acționează perpendicular pe fiecare linie care unește sîrma cu polul, căci tangenta la un cerc este întotdeauna perpendiculară pe raza corespunzătoare. Tot ce știm despre ac-

țiunea forțelor poate fi rezumat în construcția cîmpului. Prin urmare, introducem noțiunea de cîmp între cea de curent și pol magnetic pentru a reprezenta, într-un mod simplu, forțele active.

Fiecare curent este însoțit de un cîmp magnetic, adică i se poate asocia o forță care acționează asupra unui pol magnetic situat în vecinătatea sîrmei prin care trece curentul. Vom remarca, în treacăt, că această proprietate ne dă posibilitatea de a construi aparate sensibile care pun în evidență existența unui curent. O dată ce am învățat să descifrăm caracterul forțelor magnetice din modelul cîmpului unui curent, pentru a reprezenta acțiunea forțelor magnetice în fiecare punct al spațiului, vom desena de fiecare dată cîmpul care înconjură sîrma prin care trece curentul. Primul nostru exemplu este așa-numitul solenoid. Acesta este o bobină așa cum se vede în figură (fig. 46). Scopul nostru este să învățăm, din experiență, tot ce se poate, asupra cîmpului magnetic asociat curentului care trece prin solenoid și să reunim apoi aceste cunoștințe într-o reprezentare prin cîmp. Diagrama (fig. 46) reprezintă rezultatul nostru. Liniile de forță sînt curbe închise și înconjură solenoidul într-un mod caracteristic pentru cîmpul magnetic creat de un curent.

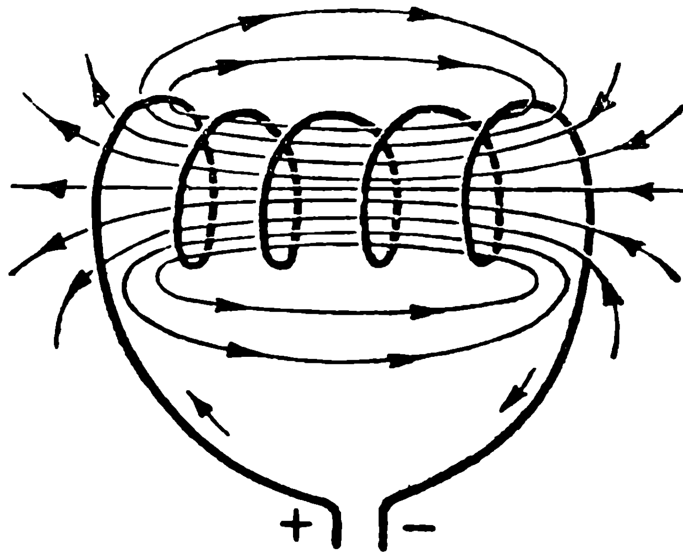


Fig. 46

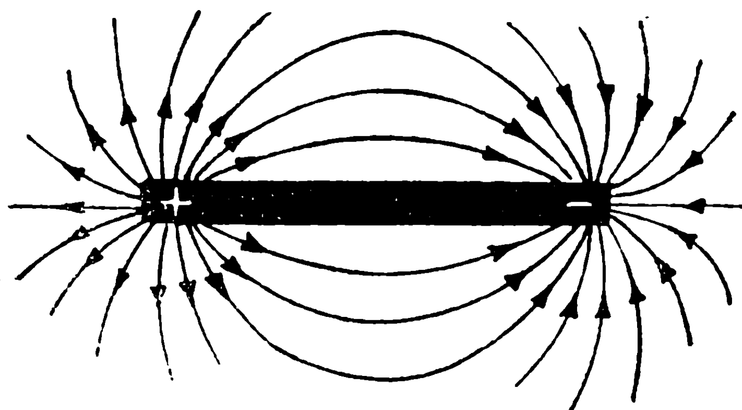


Fig. 47

Cîmpul unui magnet în formă de bară poate fi reprezentat în acelaşi mod ca şi cîmpul unui curent electric. Altă diagramă arată acest cîmp. Liniile de forță sînt îndreptate de la polul pozitiv către cel negativ (fig. 47). Vectorul-forță este situat întotdeauna pe tangenta la linia de forță și este mai lung în apropierea polilor, fiindcă în aceste puncte densitatea liniilor este cea mai mare. Vectorul-forță reprezintă acțiunea magnetului asupra unui pol magnetic pozitiv. În cazul acesta „sursa" cîmpului este magnetul și nu curentul.

Să comparăm acum cu atenție ultimele două figuri. Prima reprezintă cîmpul magnetic al unui curent care trece printr-un solenoid ; cea de a doua, cîmpul unui magnet în formă de bară. Să facem abstracție de solenoid și de bară și să comparăm numai cîmpurile exterioare lor. Vom constata că ele au exact acelaşi caracter. Şi în primul caz și în al doilea, liniile de forță merg de la un capăt la celălalt al solenoidului, respeciv al barei.

Reprezentarea cu ajutorul cîmpului își dă primele roade ! Ar fi fost destul de greu să întrezărim o asemănare mai remarcabilă între curentul care trece printr-un solenoid şi o bară magnetică dacă această asemănare nu ne-ar fi fost revelată de construcția noastră a cîmpului.

Conceptul de cîmp poate fi supus unei încercări mult mai severe. Vom stabili îndată dacă el reprezintă și altceva decît o nouă reprezentare a forțelor care acționează. Am putea raționa astfel : să admitem că, pentru moment, cîmpul caracterizează toate acțiunile determinate în mod univoc de izvoarele lui. Fireşte, aceasta este numai o bănuială. Ea înseamnă, de exemplu că, întrucît un solenoid și o bară magnetică au acelaşi cîmp, toate acțiunile lor ar trebui să fie şi ele identice. Cu alte cuvinte, doi solenoizi prin care trece curent electric ar trebui să se comporte ca două bare magnetice ; să se atragă sau să se respingă între ei într-un mod care să depindă, întocmai ca în cazul barelor, numai de poziția lor relativă. Ar însemna, deasemenea, că un solenoid și o bară să se atragă sau să se respingă întocmai ca două bare. Pe scurt, aceasta ar însemna că toate acțiunile unui solenoid străbătut de curent și ale unei bare magnetice corespunză-

toare ar fi identice, deoarece singura lor cauză este cîmpul, iar cîmpul are acelaşi caracter în amîndouă cazurile. Experienţa confirmă pe deplin bănuiala noastră !

Cît de greu ne-ar fi fost să descoperim aceste fapte fără conceptul de cîmp ! Expresia forţei care acţionează între un conductor străbătut de curent şi un pol magnetic este foarte complicată ; în cazul a doi solenoizi ar fi trebuit să cercetăm forţele cu care acţionează doi curenţi unul asupra altuia. Cu ajutorul cîmpului sezisăm însă imediat caracterul tuturor acestor acţiuni de îndată ce am stabilit asemănarea dintre cîmpul unui solenoid şi cel al unei bare magnetice.

Avem deci dreptul să privim cîmpul ca reprezentînd ceva mai mult decît am făcut pînă acum. Proprietăţile cîmpului singure apar a fi esenţiale pentru descrierea fenomenelor ; diferenţele dintre surse nu au importanţă. Conceptul de cîmp îşi relevă importanţa prin faptul că el a condus la noi fapte experimentale.

Cîmpul a devenit deci o noţiune foarte utilă. Iniţial, el fusese conceput ca ceva introdus între sursă şi acul magnetic pentru a descrie forţele active. Fusese conceput ca un simplu „agent“, prin mijlocirea căruia se exercită toată acţiunea curentului. Dar acum agentul acţionează el însuşi ca interpret, traducînd legile într-un limbaj simplu, clar, lesne de înţeles.

Primul succes al descrierii prin cîmp sugerează că ar fi util să tratăm toate acţiunile curenţilor, magneţilor şi sarcinilor în mod indirect, adică cu ajutorul cîmpului ca interpret. Cîmpul trebuie privit ca ceva asociat tot timpul unui curent. El există în cazul unui curent, chiar în absenţa unui pol magnetic menit să-i stabilească existenţa. Să încercăm să urmăm în mod consecvent această nouă cale.

Cîmpul unui conductor încărcat poate fi introdus în acelaşi mod ca şi cîmpul gravitaţional sau ca cel al unui curent sau magnet. Să luăm cel mai simplu exemplu. Pentru a descrie cîmpul unei sfere încărcate pozitiv trebuie să ne întrebăm ce fel de forţe acţionează asupra unui corp de probă încărcat pozitiv, adus în vecinătatea izvorului cîmpului, adică a sferei încărcate. Faptul că folosim

un corp de probă încărcat pozitiv și nu unul încărcat negativ este o chestiune numai de convenție care indică în ce sens trebuie îndreptate săgețile în lungul liniilor de forță. Modelul este analog cu cel al cîmpului gravitațional, datorită asemănării dintre legea lui Coulomb și cea a lui Newton (fig. 48). Singura diferență dintre cele două modele este că săgețile lor sînt îndreptate în sensuri opuse. În adevăr, două sarcini pozitive se resping, iar două

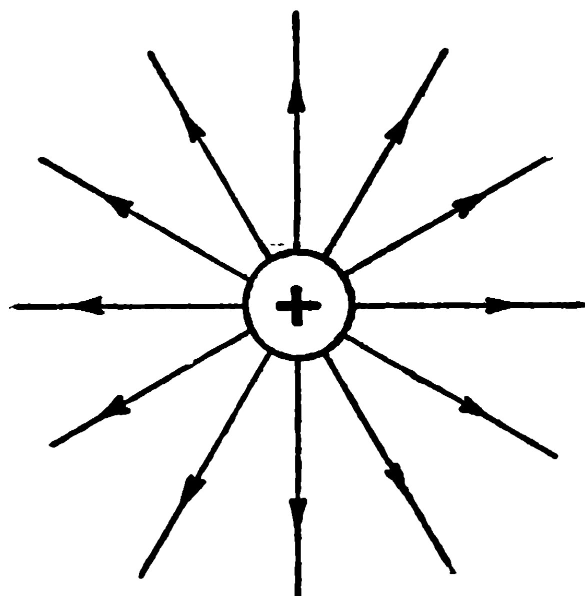


Fig. 48

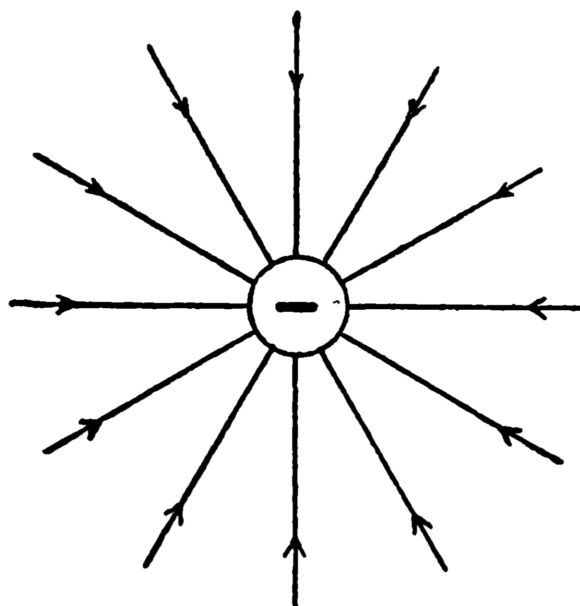


Fig. 49

mase se atrag. În schimb, cîmpul unei sfere încărcate negativ va fi identic cu cîmpul gravitațional, întrucît în cazul acesta micul corp de probă încărcat pozitiv va fi atras către izvorul cîmpului (fig. 49).

Dacă cei doi poli electrici și magnetici sînt în repaus, nu se exercită nici o acțiune între ei, nici atracție, nici respingere. Exprimînd același fapt în limbajul cîmpului putem spune : un cîmp electrostatic nu influențează un cîmp magnetostatic și reciproc. Cuvintele „cîmp static" desemnează un cîmp care nu variază în timp. Magnetul și sarcinile ar putea rămîne alături pentru vecie cu condiția de a nu fi perturbate de nici o forță exterioară. Cîmpurile electrostatic, magnetostatic și gravitațional au caractere diferite. Ele nu se amestecă ; fiecare își păstrează individualitatea fără a ține seama de celelalte.

Să ne întoarcem la sfera electrică care fusese pînă

acum în repaus și să presupunem că începe să se miște sub acțiunea unei forțe exterioare oarecare. Sfera încărcată se mișcă. În limbajul cîmpului aceasta spune : cîmpul sarcinii electrice variază în timp. Dar, după cum știm din experiența lui Rowland, mișcarea sferei încărcate este echivalentă cu un curent. De altă parte, fiecare curent este însoțit de un cîmp magnetic. Prin urmare, lanțul raționamentului nostru este :

mișcarea sarcinii → variația unui cîmp electric
↓
curent → cîmp magnetic asociat

Conchidem deci : *Variația unui cîmp electric, produsă de mișcarea unei sarcini, este însoțită întotdeauna de un cîmp magnetic.* Această concluzie se bazează pe experința lui Oersted, dar ea este mult mai cuprinzătoare. Ea conține și recunoașterea faptului că asocierea unui cîmp electric, variabil în timp, cu un cîmp magnetic este esențială pentru raționamentele noastre viitoare.

Cîtă vreme o sarcină este în repaus avem numai un cîmp electrostatic. Dar de îndată ce sarcina începe să se miște, apare și un cîmp magnetic. Putem spune mai mult : cîmpul magnetic creat de mișcarea sarcinii va fi cu atît mai intens cu cît sarcina este mai mare și cu cît se mișcă mai repede. Aceasta este o consecință tot a experienței lui Rowland. Folosind din nou limbajul cîmpului putem spune : cu cît cîmpul electric variază mai repede cu atît cîmpul magnetic asociat este mai intens.

Am încercat să traducem fapte obișnuite din limbajul fluidelor, construit în concordanță cu vechea concepție mecanicistă, în noul limbaj al cîmpului. Vom vedea mai departe, cît de clar, instructiv și cuprinzător este noul nostru limbaj.

§ 22. CEI DOI STÎLPI AI TEORIEI CÎMPULUI

„Variația unui cîmp electric este însoțită de un cîmp magnetic". Să intervertim cuvintele „magnetic" și „electric" ; ajungem astfel la o nouă afirmație : „variația unui cîmp magnetic este însoțită de un cîmp electric". Dacă ea este adevărată, poate decide numai experiența. Dar

ideea formulării acestei probleme ne este sugerată de folosirea limbajului cîmpului.

Acum mai bine de 100 ani, Faraday a efectuat o experiență care a condus la celebra descoperire a curenților induși.

Demonstrația este foarte simplă. Nu avem nevoie decît de un solenoid sau alt circuit, de o bară magnetică și de unul din multiplele tipuri de aparate care indică existența curentului electric. Iată experiența : o bară magnetică este menținută nemișcată în apropierea unui solenoid care formează un circuit închis. Prin sîrmă nu trece curent pentru că nu există nici un izvor de curent (fig. 50). Există numai cîmpul magnetostatic al barei magnetice, care nu variază în timp. Schimbăm brusc poziția magnetului, fie îndepărtîndu-l, fie apropiindu-l de solenoid, după preferință. În clipa aceasta apare un curent pentru foarte scurt timp și apoi dispare. Ori de cîte ori schimbăm poziția magnetului față de solenoid apare un curent pe care îl detectăm cu un aparat destul de sensibil. Dar, din punctul de vedere al teoriei cîmpului, un curent înseamnă existența unui cîmp electric care silește fluidul electric să curgă prin sîrmă. Curentul, și prin urmare și cîmpul electric, dispare cînd magnetul rămîne din nou nemișcat.

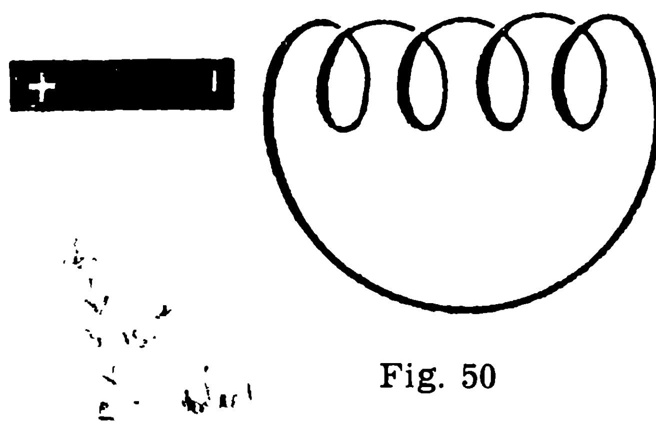


Fig. 50

Să admitem pentru moment că nu am cunoaște limbajul cîmpului și că ar trebui să descriem, calitativ și cantitativ, rezultatele acestei experiențe, în limbajul vechilor noțiuni mecaniciste. Experiența noastră spune : prin mișcarea unui dipol magnetic, s-a creat o nouă forță care a pus în mișcare fluidul electric în sîrmă. Întrebarea următoare va fi : de cine depinde această forță ? Ne-ar fi greu să răspundem. Trebuie să cercetăm dependența forței de viteza magnetului, de forma lui și de forma circuitului. Mai departe, această experiență, interpretată în vechiul

limbaj, nu ne dă nici o indicație dacă curentul ar putea fi produs de mișcarea unui alt circuit străbătut de curent sau numai de mișcarea unei bare magnetice.

Este cu totul altfel dacă întrebuințăm limbajul cîmpului și, conform principiului nostru, spunem că acțiunea

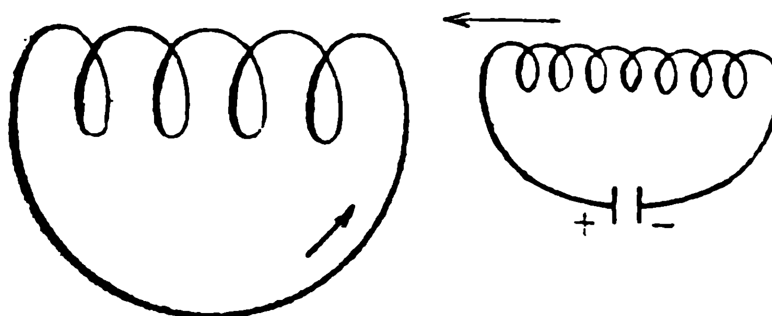


Fig. 51

este determinată de cîmp. Se vede dintr-o dată că un solenoid străbătut de un curent servește tot așa de bine ca și o bară magnetică. În fig. 51 sînt reprezentați doi solenoizi : unul mic, prin care curge curent, și altul mai mare, în care este indus curentul detectat. Putem deplasa solenoidul cel mic, cum am deplasat și bara magnetică ; se produce un curent indus în solenoidul cel mare. Mai mult, în loc de a deplasa solenoidul mic, vom putea produce sau suprima un cîmp magnetic producînd sau suprimînd curentul, adică închizînd și deschizînd circuitul. Încă o dată, noi fapte sugerate de teoria cîmpului sînt confirmate de experiență.

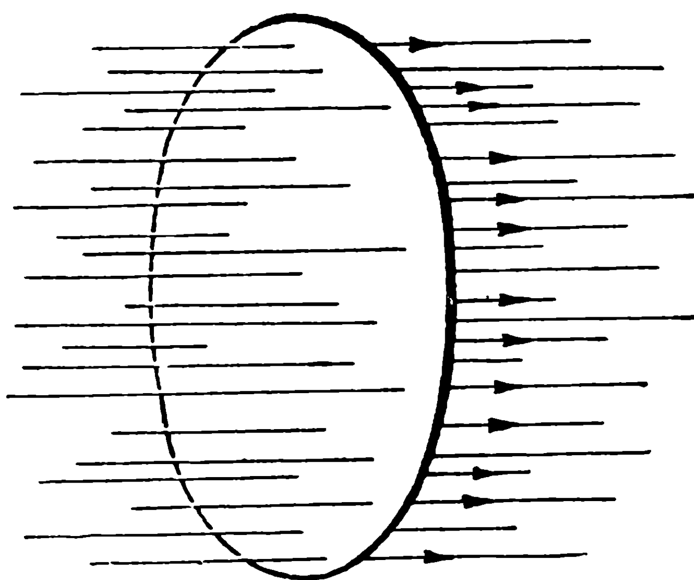


Fig. 52

Să luăm un exemplu mai simplu. Avem o sîrmă închisă care nu este legată cu nici o sursă de curent. Undeva în apropiere este un cîmp magnetic. Nu ne interesează dacă sursa acestui cîmp magnetic este un alt circuit prin care trece un curent electric sau este o bară magnetică.

Figura 52 înfățișează circuitul închis și liniile de forță magnetice. Descrierea calitativă și cantitativă a fenomenelor de inducție este foarte simplă în termenii limbajului cîmpului. Cum se vede din figură, o parte din liniile de forță trec prin suprafața limitată de sîrmă. Să considerăm liniile de forță care înțeapă porțiunea planului mărginita de sîrmă. Cîtă vreme nu variază cîmpul, nu trece curent electric, oricît de mare ar fi intensitatea lui. Dar, de îndată ce numărul liniilor care străbat suprafața mărginită de sîrmă variază, începe să treacă un curent prin sîrmă. Curentul este determinat de variația numărului de linii de forță care străbat suprafața, indiferent de modul în care s-ar produce această variație. Ea este singura noțiune esențială pentru descrierea atît calitativă cît și cantitativă a curentului indus. „Numărul de linii variază" înseamnă că se schimbă densitatea liniilor, deci că variază intensitatea cîmpului.

Punctele esențiale în raționamentul nostru sînt : variația cîmpului magnetic → curent indus → mișcarea sarcinii → existența unui cîmp electric.

Deci : *un cîmp magnetic variabil este însoțit de un cîmp electric.*

Am găsit astfel, cei doi stîlpi ai teoriei cîmpurilor electric și magnetic. Primul este legătura dintre cîmpul electric variabil și cîmpul magnetic. El a derivat din experiența lui Oersted, asupra devierii acului magnetic și a dus la concluzia că : *un cîmp electric variabil este însoțit de un cîmp magnetic.*

Cel de al doilea leagă cîmpul magnetic variabil de curentul indus și a derivat din experiența lui Faraday. Împreună, ei constituie baza unei descrieri cantitative.

Din nou cîmpul electric asociat cîmpului magnetic variabil apare ca ceva real. Mai sus a trebuit să admitem existența cîmpului magnetic al unui curent și în absența polului de probă. Asemănător trebuie să admitem acum existența cîmpului electric chiar dacă lipsește sîrma cu care se poate constata prezența curentului indus.

De fapt, construcția noastră bazată pe doi stîlpi ar putea fi redusă la o construcție bazată pe unul singur, anume pe cel derivat din experiența lui Oersted. Rezulta-

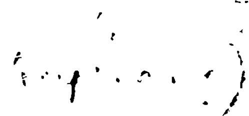
tul experienței lui Faraday ar putea fi dedus din cea a lui Oersted cu ajutorul legii conservării energiei. Am adoptat construcția pe cele două baze numai pentru claritate și economie.

Vom menționa încă o consecință a descrierii cu ajutorul cîmpului. Fie un circuit prin care trece un curent a cărui sursă este, de exemplu, o baterie voltaică. Să întrerupem brusc legătura dintre sîrmă și sursa de curent. Bineînțeles, curentul se întrerupe. Dar în timpul acestei scurte întreruperi are loc un proces complicat, care poate fi deasemenea prevăzut în teoria cîmpului. Înainte de întreruperea curentului exista un cîmp magnetic în jurul sîrmei. În momentul întreruperii curentului, el a încetat să mai existe. Așadar, prin întreruperea curentului, a dispărut un cîmp magnetic. Numărul de linii de forță care trec prin suprafața limitată de sîrmă a variat foarte rapid. Dar o astfel de schimbare rapidă, oricum s-ar produce, trebuie să creeze un curent indus. Ceea ce interesează este variația cîmpului magnetic care face curentul indus mai intens dacă variația este mai mare. Această consecință este o altă piatră de încercare pentru teorie. Întreruperea unui curent ar trebui să fie însoțită de apariția momentană a unui curent indus intens. Experiența confirmă și această prevedere. Oricine a întrerupt cîndva un curent a observat că se produce o scînteie. Această scînteie pune în evidență marea diferență de potențial provocată de variația rapidă a cîmpului magnetic.

Același proces poate fi privit și dintr-un punct de vedere energetic. Un cîmp magnetic a dispărut și s-a produs o scînteie. Dar o scînteie reprezintă energie, prin urmare și cîmpul magnetic reprezintă energie. Pentru a aplica în mod consecvent noțiunea de cîmp și limbajul cîmpului trebuie să privim cîmpul magnetic ca un rezervor de energie. Numai astfel sîntem în stare să descriem fenomenele electrice și magnetice în concordanță cu legea conservării energiei.

De unde la început fusese numai un model util, cîmpul a devenit din ce în ce mai real. El ne-a ajutat să înțelegem fapte vechi și ne-a condus la altele noi. Atribuind cîmpului o energie, am făcut încă un pas înainte în dez-

voltarea în care noțiunea de cîmp a cîștigat din ce în ce mai mult în importanță, în vreme ce noțiunea de substanță, atît de esențială pentru punctul de vedere mecanicist, a fost părăsită din ce în ce mai mult.



§ 23. REALITATEA CÎMPULUI

Descrierea cantitativă, matematică, a legilor cîmpului este rezumată în ecuațiile lui Maxwell. La formularea lor au condus faptele menționate pînă acum, dar conținutul acestor ecuații este mult mai bogat decît am fost în stare să-l înfățișăm. Forma lor simplă ascunde o adîncime pe care o dezvăluie numai un studiu amănunțit.

Formularea acestor ecuații este cel mai important eveniment în fizică de la Newton încoace, nu numai din cauza bogăției conținutului lor, dar și pentru că ele reprezintă prototipul unui nou tip de legi.

Caracteristicile ecuațiilor lui Maxwell, care se regăsesc în toate celelalte ecuații ale fizicii moderne, sînt rezumate într-o singură afirmație. Ecuațiile lui Maxwell sînt legi care exprimă *structura* cîmpului.

De ce ecuațiile lui Maxwell se deosebesc ca formă și caracter de ecuațiile mecanicii clasice ? Ce sens are afirmația că aceste ecuații descriu structura cîmpului ? Cum este posibil ca din rezultatele experimentale ale lui Oersted și Faraday să formulăm un nou tip de lege, care se dovedește atît de important pentru dezvoltarea ulterioară a fizicii ?

Am văzut din experiența lui Oersted cum liniile de forță ale cîmpului magnetic se închid în jurul unui cîmp electric variabil. Am văzut din experiența lui Faraday cum liniile de forță ale cîmpului electric se închid în jurul unui cîmp magnetic variabil. Pentru a schița unele trăsături caracteristice ale teoriei lui Maxwell să ne concentrăm toată atenția asupra uneia din cele două experiențe, să zicem asupra experienței lui Faraday. Reproducem desenul care reprezintă inducerea unui curent electric de către un cîmp magnetic variabil (fig. 53). Știm că dacă numărul liniilor de forță care trec prin suprafața mărginită de sîrmă variază, atunci apare un curent indus. Prin urmare, cu-

rentul va apare fie dacă variază cîmpul magnetic, fie dacă circuitul este deformat sau deplasat ; cu alte cuvinte dacă variază numărul liniilor magnetice care trec prin suprafață, indiferent cum se produce această variație. Pentru a ține seamă de toate aceste posibilități, pentru a analiza influența fiecăreia în parte, ar fi necesară o teorie foarte complicată. Dar nu putem oare simplifica problema ? Să încercăm să eliminăm din considerațiile noastre tot ce privește forma circuitului, lungimea lui, aria mărginită de sîrmă. Să ne imaginăm că circuitul din ultima noastră figură devine din ce în ce mai mic, strîngîndu-se treptat către un circuit foarte mic, care înconjură un anumit punct al spațiului. Atunci, tot ceea ce privește forma și mărimea lui nu mai contează. În cazul limită, în care curba închisă se reduce la un punct, mărimea și forma circuitului se elimină în mod automat după considerațiile noastre și obținem astfel legi care leagă între ele variațiile cîmpului electric și magnetic într-un punct arbitrar al spațiului, într-un moment oarecare.

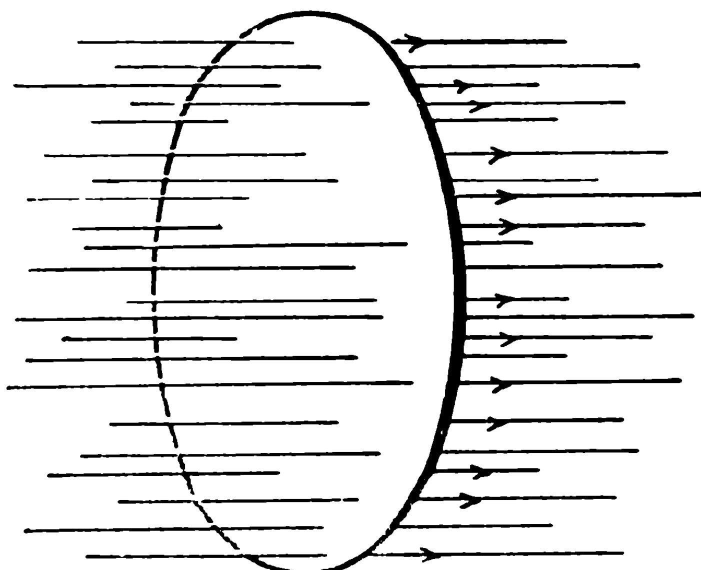


Fig. 53

Acesta este unul dintre principalii pași care conduc la ecuațiile lui Maxwell. El reprezintă tot o experiență idealizată prin care repetăm în imaginație, experiența lui Faraday cu un circuit care tinde către un punct.

De fapt, ar trebui să-l numim mai curînd o jumătate de pas, decît un pas întreg. Pînă acum ne-am concentrat atenția asupra experienței lui Faraday. Trebuie însă ca să tratăm cu aceeași atenție și în același fel celălalt stîlp al teoriei cîmpului bazat pe experiența lui Oersted. În această experiență liniile de forță magnetice se închid în jurul curentului. O a doua jumătate de pas o constituie strîngerea liniilor de forță magnetice circulare

într-un punct, iar întregul pas reprezintă o corelaţie între variaţiile cîmpurilor electric şi magnetic în jurul unui punct arbitrar al spaţiului, într-un moment oarecare.

Este însă necesar un al doilea pas esenţial. Potrivit experienţei lui Faraday este nevoie de o sîrmă pentru a stabili existenţa cîmpului electric, după cum în experienţa lui Oersted este nevoie de un pol magnetic sau de un ac magnetic pentru a constata existenţa cîmpului magnetic. Dar noile idei teoretice ale lui Maxwell depăşesc aceste fapte experimentale. În teoria lui Maxwell, cîmpul electric şi magnetic, sau pe scurt cîmpul *electromagnetic*, este ceva real. Cîmpul electric este produs de un cîmp magnetic variabil absolut independent de faptul dacă există sau nu o sîrmă care să-i stabilească existenţa ; de asemenea, un cîmp magnetic este produs de un cîmp electric variabil, indiferent dacă există sau nu un pol magnetic care să-i indice existenţa.

Doi paşi esenţiali conduc la ecuaţiile lui Maxwell. Primul : din considerarea experienţelor lui Oersted şi Rowland, liniile circulare ale cîmpului magnetic, care se închid în jurul cîmpului electric variabil, trebuie făcute să tindă către un punct ; din considerarea experienţei lui Faraday, liniile circulare ale cîmpului electric, care se închid în jurul cîmpului magnetic variabil, trebuie şi ele făcute să tindă către un punct. Al doilea pas este conceperea cîmpului ca ceva real ; cîmpul electromagnetic, o dată creat, există, acţionează şi variază după legile lui Maxwell.

Ecuaţiile lui Maxwell descriu structura cîmpului electromagnetic. Scena acestor legi este întregul spaţiu şi nu numai punctele în care există sarcină sau materie, ca în cazul legilor mecanice.

Ne amintim care era situaţia în mecanică. Cunoscînd poziţia şi viteza unei particule într-un singur moment precum şi forţele active se putea prevede întreaga traiectorie ulterioară a particulei. În teoria lui Maxwell, dacă ştim cîmpul într-un singur moment, putem deduce din ecuaţiile teoriei, cum va varia cîmpul în spaţiu şi în timp. De asemenea, ecuaţiile lui Maxwell ne dau posibilitatea să reconstituim istoria cîmpului, după cum ecuaţiile me-

canicii ne dădeau posibilitatea să reconstituim istoria unei particule materiale.

Există, totuși, o deosebire esențială între legile mecanicii și legile lui Maxwell. Compararea legilor gravitației ale lui Newton cu legile cîmpului ale lui Maxwell va scoate în evidență o serie de fapte caracteristice acestor ecuații.

Cu ajutorul legilor lui Newton putem deduce mișcarea Pămîntului din forța care acționează între Soare și Pămînt. Aceste legi leagă mișcarea Pămîntului cu acțiunea îndepărtatului Soare. Pămîntul și Soarele, deși atît de departe unul de altul, sînt ambii actori în jocul forțelor.

În teoria lui Maxwell nu există actori materiali. Ecuațiile matematice ale acestei teorii exprimă legile care guvernează cîmpul electromagnetic. Ele nu leagă, ca în legile lui Newton, două evenimente separate printr-o distanță atît de mare ; ele nu leagă ceea ce se întîmplă *aici* cu condițiile de *acolo*. Cîmpul de *aici* și *de acum* depinde de cîmpul din *imediata vecinătate* și dintr-un moment *imediat anterior*. Ecuațiile ne permit să pecizăm ce se va întîmpla puțin mai încolo și puțin mai tîrziu, dacă știm ceea ce se întîmplă aici și acum. Ele ne permit să extindem cunoașterea cîmpului, prin pași mici. Putem deduce ceea ce se întîmplă aici din ceea ce s-a întîmplat departe de aici însumînd acești pași foarte mici. În teoria lui Newton, dimpotrivă, sînt permiși numai pași mari care leagă evenimente îndepărtate. Concluziile experiențelor lui Oersted și Faraday pot fi redobîndite din teoria lui Maxwell, dar numai prin însumarea pașilor mici, guvernați fiecare în parte de ecuațiile lui Maxwell.

Un studiu matematic mai adîncit al ecuațiilor lui Maxwell arată că se pot trage concluzii noi și cu adevărat neașteptate și că întreaga teorie poate fi supusă unei verificări la un nivel mai înalt, deoarece consecințele teoretice au acum un caracter cantitativ și decurg dintr-un lanț întreg de argumente logice.

Să ne imaginăm din nou o experiență idealizată. O mică sferă încărcată electric este silită, de către o acțiune exterioară oarecare, să oscileze rapid, ritmic, ca un

pendul. Cu cunoştinţele pe care le avem despre variaţiile cîmpului, cum vom descrie în limbajul cîmpului ceea ce se petrece local în cazul acesta ?

Oscilaţia sarcinii produce un cîmp electric variabil. El este însoţit întotdeauna de un cîmp magnetic variabil. Dacă în apropiere se află o sîrmă care formează un circuit închis, atunci cîmpul magnetic va fi însoţit, la rîndul lui, de un curent electric în circuit. Toate acestea nu sînt decît repetarea unor fapte cunoscute, dar studiul ecuațiilor lui Maxwell ne permite să pătrundem mai adînc în problema sarcinii electrice oscilante. Printr-un raționament matematic, din ecuaţiile lui Maxwell putem să stabilim caracterul cîmpului din jurul unei sarcini care oscilează, structura lui aproape și departe de sursă precum și variația lui în timp. Rezultatul acestui raționament este *unda electromagnetică*. Sarcina care oscilează radiază energie, care străbate spaţiul cu o viteză bine definită ; dar propagarea energiei și variația unei stări sînt caracteristice tuturor fenomenelor ondulatorii.

Ne-am ocupat pînă acum cu diferite tipuri de unde. Am avut de a face cu unda longitudinală produsă de sfera care pulsa, în care caz ceea ce se propaga în mediu erau variaţiile densității. Am avut mediul gelatinoid în care se propaga unda transversală. În cazul acesta, înainta în mediu o deformare a gelatinei, produsă de rotația sferei. De ce natură sînt variaţiile care se răspîndesc în cazul unei unde electromagnetice ? Ele sînt tocmai variațiile cîmpului electromagnetic ! Orice variație a unui cîmp electric produce un cîmp magnetic, orice variație a acestui cîmp magnetic produce un cîmp electric și așa mai departe. Deoarece cîmpul reprezintă energie, toate aceste variații care se răspîndesc în spațiu cu o viteză anumită constituie o undă. După cum rezultă din teorie, liniile de forță magnetice și electrice sînt situate întotdeauna în plane perpendiculare pe direcţia de propagare. Unda generată este deci transversală. Aspectele inițiale ale imaginii cîmpului, furnizată de experienţele lui Oersted și Faraday, subsistă întotdeauna dar constatăm că această imagine are o semnificație mai adîncă.

Unda electromagnetică se propagă în vid ; aceasta

rezultă din teorie. Dacă sarcina care oscilează încetează brusc să se mişte, atunci cîmpul ei devine electrostatic. Dar seria de unde create de oscilaţie continuă să se răspîndească. Undele au o existenţă independentă şi istoria variaţiilor lor poate fi urmărită întocmai ca a oricărui obiect material.

Ne dăm seama că imaginea undei electromagnetice care se propagă cu o viteză anumită în spaţiu şi care variază în timp, rezultă din ecuaţiile lui Maxwell, pentru faptul că ele descriu structura cîmpului electromagnetic în fiecare punct din spaţiu şi în fiecare moment al timpului.

Mai este o chestiune importantă. Cu ce viteză se propagă o undă electromagnetică în vid ? Teoria, cu ajutorul unor date deduse din experienţe simple care nu au nimic de a face cu propagarea efectivă a undelor, dă un răspuns clar la această întrebare : *viteza unei unde electromagnetice este egală cu viteza luminii.*

Experienţele lui Oersted şi Faraday alcătuiesc baza legilor lui Maxwell. Toate rezultatele noastre de pînă acum au fost dobîndite printr-un studiu atent al acestor legi, exprimate în limbajul cîmpului. Descoperirea teoretică a undei electromagnetice care se propagă cu viteza luminii este una din cele mai mari cuceriri din istoria ştiinţei.

Experienţa a confirmat prezicerile teoriei. În urmă cu 50 ani Hertz a dovedit, pentru prima oară, existenţa undelor electromagnetice şi a confirmat experimental că viteza lor este egală cu viteza luminii. Astăzi, milioane de oameni verifică faptul că undele electromagnetice pot fi emise şi recepţionate. Aparatul lor este mult mai complicat decît cel folosit de Hertz şi descoperă prezenţa undelor la mii de kilometri de izvorul lor, nu numai la cîţiva metri.

§ 24. CÎMPUL ŞI ETERUL

Unda electromagnetică este o undă transversală care se propagă cu viteza luminii în vid. Egalitatea celor două viteze sugerează o legătură strînsă între fenomenele optice şi cele electromagnetice.

Cînd am avut de ales între teoria corpusculară și cea ondulatorie, am optat pentru teoria ondulatorie. Cel mai puternic dintre argumentele care ne-au influențat hotărîrea a fost difracția luminii. Nu contrazicem însă nici una din explicațiile date fenomenelor optice admițînd că și *unda de lumină este o undă electromagnetică.* Dimpotrivă, putem deduce fapte suplementare. Dacă este cu adevărat așa, atunci trebuie să existe o legătură oarecare între proprietățile optice și cele electrice ale materiei, legătură care poate fi dedusă din teorie. Faptul că se pot trage efectiv astfel de concluzii și că ele rezistă experienței este un argument esențial în favoarea teoriei electromagnetice a luminii.

Acest important rezultat este datorit teoriei cîmpului. Două ramuri ale științei, în aparență fără legătură, sînt unite în aceeași teorie. Aceleași ecuații ale lui Maxwell descriu atît inducția electromagnetică cît și refracția optică. Or, dacă obiectivul nostru este să descriem cu ajutorul unei singure teorii tot ce s-a întîmplat sau se va întîmpla cîndva, atunci fuzionarea opticii cu electricitatea constituie fără îndoială un mare pas înainte. Din punctul de vedere fizic, singura deosebire dintre o undă electromagnetică obișnuită și o undă de lumină este lungimea de undă : ea este foarte mică pentru undele de lumină înregistrate de ochiul omenesc și este mare pentru undele electromagnetice obișnuite care sînt detectate de un receptor de radio.

Vechea concepție mecanicistă încercase să reducă toate evenimentele din natură la forțe care acționează între particulele materiale. Pe această concepție mecanicistă a fost clădită prima teorie, naivă, a fluidelor electrice. Pentru fizicianul de la începutul secolului al XIX-lea cîmpul era inexistent. Pentru el numai substanțele și schimbările lor erau reale. El se străduia să descrie acțiunea a două sarcini electrice numai cu ajutorul unor noțiuni care se raportau direct la cele două sarcini.

La început conceptul de cîmp nu era mai mult decît un mijloc de a înlesni înțelegerea fenomenelor din punctul de vedere mecanic.

În noul limbaj al cîmpului, descrierea cîmpului dintre două sarcini, şi nu sarcinile înseşi, este esenţială pentru înţelegerea acţiunii lor. Recunoaşterea acestor noi concepte a crescut în mod continuu, în timp ce substanţa a fost lăsată în umbră de către conceptul de cîmp. S-a înţeles că s-a întîmplat ceva de o mare importanţă în fizică. A fost creată o nouă realitate, un nou concept pentru care nu era loc în descrierea mecanică. Cu încetul şi prin luptă, conceptul de cîmp şi-a stabilit singur un loc conducător în fizică şi a devenit unul dintre conceptele de bază ale fizicii. Pentru fizicianul modern, cîmpul electromagnetic este ceva tot atît de real ca şi scaunul pe care şade.

Însă ar fi greşit să credem că noua concepţie a cîmpului a eliberat ştiinţa de erorile vechii teorii a fluidelor electrice sau că noua teorie anulează realizările celei vechi. O nouă teorie pune în lumină atît calităţile cît şi limitele vechii teorii şi ne permite să redobîndim vechile noţiuni dintr-un alt punct de vedere (mai înalt). Acest lucru este valabil nu numai în cazul teoriei fluidelor electrice şi a cîmpului ci şi pentru toate prefacerile teoriilor fizice, oricît de revoluţionare ar părea ele. De exemplu, în cazul nostru, vom regăsi în teoria lui Maxwell conceptul de sarcină electrică, chiar dacă sarcina este concepută numai ca izvor al cîmpului electric. Legea lui Coulomb continuă de asemenea să fie valabilă şi este conţinută în ecuaţiile lui Maxwell, din care poate fi dedusă ca una din numeroasele lor consecinţe. Putem aplica şi de aici înainte teoria veche ori de cîte ori cercetăm fapte care intră în domeniul ei de valabilitate. Dar putem tot atît de bine să folosim noua teorie, dat fiind că toate faptele cunoscute sînt conţinute în sfera ei de valabilitate.

Folosind o comparaţie, putem spune că crearea unei noi teorii nu este asemănătoare cu distrugerea unui şopron vechi şi ridicarea în locul lui a unui zgîrie nori. Ea se aseamănă mai degrabă cu o ascensiune pe un munte, în cursul căreia perspectiva se schimbă şi se lărgeşte necontenit, dîndu-ne prilejul să descoperim legături neaşteptate între punctul nostru de plecare şi împrejurimile lui

bogate. Dar locul de unde am plecat nu va înceta să existe și se va zări încă de pe culme ; el va părea însă mult mai mic, reprezentînd doar o părticică neînsemnată din larga priveliște pe care ne-am cucerit-o învingînd obstacolele ivite de-a lungul urcușului nostru plin de peripeții.

În realitate a trecut mult timp pînă cînd s-a reușit să se recunoască tot conținutul teoriei lui Maxwell. La început, cîmpul a fost considerat ca ceva care urma să fie interpretat ulterior din punctul de vedere mecanicist cu ajutorul eterului. Cu timpul s-a înțeles că programul acesta nu poate fi înfăptuit pînă la capăt ; realizările teoriei cîmpului deveniseră prea evidente și importante pentru a se putea renunța la ele în favoarea unei dogme mecaniciste. De altă parte, problema imaginării unui model mecanic al eterului părea să prezinte din ce în ce mai puțin interes, iar rezultatele, dat fiind caracterul artifical și forțat al presupunerilor, să devină din ce în ce mai descurajatoare.

Singura ieșire pare a fi să admitem pur și simplu că spațiul are proprietatea fizică de a transmite unde electromagnetice, și a nu ne preocupa prea mult de semnificația acestei afirmații. Putem folosi și mai departe cuvîntul „eter", dar numai pentru a exprima o proprietate fizică a spațiului. Termenul „eter" și-a schimbat de mai multe ori înțelesul în cursul dezvoltării științei. În etapa de față el a încetat să reprezinte un mediu construit din particule. Povestea lui nu este însă nicidecum sfîrșită ; ea este continuată de teoria relativității.

§ 25. SISTEM DE REFERINȚĂ

Ajunși la această treaptă a povestirii noastre trebuie să ne întoarcem la punctul ei de plecare, la legea inerției, a lui Galileu. Citâm din nou :

„orice corp își păstrează starea sa de repaus sau de mișcare uniformă în linie dreaptă dacă nu este constrîns de forțele care-l solicită să-și schimbe starea".

Cine a înțeles o dată ideea inerției nu vede ce s-ar mai putea spune despre ea. Cu toate acestea, deși această problemă a fost discutată în mod amănunțit, ea este departe de a fi epuizată.

Să ne imaginăm un om de știință serios care este convins că legea inerției poate fi dovedită sau infirmată pe bază de experiențe reale. El rostogolește mici sfere pe o masă orizontală încercînd să elimine, pe cît se poate, frecarea. El observă că mișcarea devine cu atît mai uniformă cu cît masa și sferele sînt mai netede. Tocmai cînd este pe cale să enunțe principiul inerției, cineva îi face o farsă pe neașteptate. Fizicianul nostru lucrează într-o cameră fără ferestre și nu are nici un fel de comunicație cu lumea de afară. Glumețul nostru montează un mecanism care-i dă posibilitatea să pună toată camera în rotație rapidă în jurul unei axe trecînd prin centrul ei. De îndată ce începe rotația, fizicianul face constatări noi și neașteptate. Sfera care pînă atunci se mișca uniform tinde să se îndepărteze cît mai mult de centru și să se apropie cît se poate de mult de pereții camerei ! Asupra lui însuși simte o forță care-l împinge spre perete. Ea îi provoacă senzația pe care ar avea-o dacă s-ar afla într-un tren sau automobil care ia o turnantă bruscă sau dacă s-ar da în călușei. Toate rezultatele lui anterioare se spulberă.

Fizicianul nostru se găsește în situația de a părăsi o dată cu legea inerției toate legile din mecanică. Legea inerției fusese doar punctul lui de plecare. O dată ce acesta s-a schimbat, se schimbă implicit și concluziile sale. Un observator sortit să-și petreacă toată viața în camera care se rotește și să-și facă experiențele în ea, ar ajunge la legi ale mecanicii diferite de ale noastre. Însă, dacă el pășește pragul camerei înarmat cu o cunoaștere perfectă a principiilor fizicii și ferm convins de exactitatea lor, el nu poate explica prăbușirea aparentă a mecanicii decît admițînd că încăperea se rotește. Cu ajutorul unor experiențe mecanice el ar putea chiar să precizeze felul rotației.

De ce ne preocupăm atît de mult de observatorul din camera care se rotește ? Pur și simplu pentru că noi pe Pămînt sîntem, oarecum, în aceeași situație ca el. Încă

de la Copernic, știm că Pămîntul se rotește în jurul axei sale precum și în jurul Soarelui. Este drept că nici măcar această idee simplă, atît de limpede pentru oricine, nu a fost cruțată de progresul științei. Dar să trecem peste aceasta acceptînd, pentru moment, punctul de vedere al lui Copernic. Prin urmare, dacă observatorul nostru care se rotește nu poate confirma legile mecanicii, noi pe Pămînt vom fi de asemenea incapabili să facem acest lucru. Dar rotația Pămîntului este relativ lentă, astfel că efectul nu este prea accentuat. Există totuși multe experiențe care pun în evidență o mică abatere de la legile mecanicii și concordanța lor poate fi privită ca o dovadă a rotației Pămîntului.

Din păcate, nu ne putem instala undeva între Soare și Pămînt pentru a dovedi că acolo legea inerției este perfect valabilă și pentru a putea „vedea cu ochii" că Pămîntul se rotește. Putem face aceasta numai în imaginație. Toate experiențele noastre trebuie să fie executate pe Pămînt unde sîntem constrînși să trăim. Faptul acesta este exprimat deseori sub o formă mai științifică : *Pămîntul este sistemul nostru de coordonate.*

Pentru a arăta mai limpede semnificația acestor cuvinte, să luăm un exemplu simplu. Putem să prezicem poziția, în fiecare moment, a unei pietre aruncate dintr-un turn și să confirmăm prezicerea noastră prin observație. Așezînd de-a lungul turnului o riglă, putem prezice cu ce diviziune a ei va coincide, în fiecare moment, corpul care cade. Bine înțeles turnul și gradația nu trebue făcute din cauciuc sau alt material susceptibil să sufere schimbări în timpul experienței. În principiu, tot ce ne trebuie efectiv pentru experiență se rezumă la gradația invariabilă, solidară cu Pămîntul și la un ceasornic bun. Dacă le avem, putem face abstracție nu numai de arhitectura turnului ci chiar și de prezența lui. Presupunerile acestea sînt toate banale și, de obicei, nici nu se specifică în descrierea unor astfel de experiențe. Această analiză arată cîte presupuneri tacite conține fiecare din afirmațiile noastre ! În cazul nostru, am presupus existența unei bare rigide și a unui ceasornic ideal, fără de care ar fi imposibil să verificăm legea lui Galileu a că-

derii corpurilor. Cu acest utilaj simplu dar fundamental, o riglă și un ceasornic, putem confirma această lege mecanică cu un anumit grad de precizie. Executată cu îngrijire, această experiență scoate în evidență discordanța dintre teorie și experiență, datorită rotației Pămîntului sau, cu alte cuvinte, faptul că legile mecanicii, așa cum au fost ele formulate mai sus, nu sînt valabile în mod riguros într-un sistem de coordonate solidar cu Pămîntul.

În toate experiențele mecanice, oricare ar fi tipul lor, trebuie să determinăm poziția unor puncte materiale la un moment dat întocmai ca în experiența de mai sus cu corpul în cădere. Dar poziția trebuie întotdeauna descrisă față de ceva, de exemplu în cazul anterior față de turn sau de gradație. Pentru a putea determina poziția corpurilor trebuie să dispunem de un *sistem de referință,* un reper mecanic. De exemplu, cînd indicăm poziția obiectelor sau a oamenilor dintr-un oraș, sistemul de referință îl constituie străzile și bulevardele orașului. Pînă acum, cînd am enunțat legile mecanicii, nu ne-am preocupat de specificarea sistemului de referință, deoarece faptul că trăim pe Pămînt ne permite să fixăm fără nici o dificultate, în oricare caz particular, un sistem de referință solidar cu Pămîntul. Acest sistem, la care raportăm toate observațiile noastre, alcătuit din corpuri rigide invariabile, se numește *sistem de coordonate.* Deoarece termenul acesta îl vom folosi foarte des vom scrie pescurtat S.C.

Toate afirmațiile noastre fizice de pînă acum păcătuiesc prin aceeași lacună : nu am ținut seama de faptul că orice observație trebuie raportată la un anumit S.C. În loc să descriem structura acestui S.C. noi i-am ignorat existența. De exemplu, cînd am scris „un corp se mișcă uniform..." ar fi trebuit de fapt să scriem : „un corp se mișcă uniform față de un S.C. determinat". Experiența noastră cu camera ce se rotește ne-a învățat că rezultatele experiențelor mecanice pot depinde de S.C.-ul ales.

Dacă două S.C.-uri se rotesc unul față de altul atunci legile mecanicii nu pot fi valabile în amîndouă sistemele. De exemplu, dacă cele două sisteme de coordonate sînt reprezentate de două bazine de înot, atunci dacă în unul din ele suprafața apei este orizontală, în cel de al doilea

ea are forma concavă, familiară de la amestecarea cafelei cu lingurița.

Formulînd principalele legi ale mecanicii am omis un punct important. Nu am precizat pentru care S.C. sînt ele valabile. Din această cauză, întreaga mecanică clasică este suspendată în aer dat fiind că nu știm la ce sistem de coordonate trebuie s-o raportăm. Să trecem totuși pentru un moment peste această dificultate. Vom face presupunerea puțin incorectă că legile mecanicii clasice sînt valabile în fiecare S.C. legat solidar cu Pămîntul. Facem aceasta pentru a fixa S.C.-ul și pentru a da un caracter precis afirmațiilor noastre. Să acceptăm deci, pentru moment, afirmația noastră că Pămîntul este un sistem de referință adecuat, deşi ea nu este absolut corectă.

Admitem deci că există un S.C. pentru care legile mecanicii sînt valabile. Este însă acesta singurul ? Să presupunem că am adoptat drept S.C. un tren, un vapor sau un aeroplan care se mișcă față de Pămînt. Vor fi valabile legile mecanicii pentru aceste noi S.C.-uri ? Noi știm bine că ele nu sînt valabile întotdeauna ; de exemplu, în cazul unui tren la curbă, al unui vapor zgîlțîit de furtună, al unui avion care virează în aer. Să începem cu un exemplu simplu. Un S.C. se mișcă uniform față de S.C.-ul nostru „bun“, pentru a denumi astfel un sistem în care legile mecanicii sînt valabile, de exemplu un tren ideal sau un vapor care plutește încîntător de lin, în linie dreaptă și cu viteză invariabilă. Știm din experiența de toate zilele că amîndouă sistemele vor fi „bune“, că experiențele fizice efectuate în trenul sau pe vaporul care se mișcă uniform vor da exact acelaşi rezultat ca şi pe Pămînt. Dar dacă trenul se oprește sau este accelerat brusc sau dacă marea este agitată se petrec lucruri ciudate. În tren, bagajele cad din plasa port-bagaj ; pe vapor scaunele și mesele se răstoarnă, iar pasagerii capătă rău de mare. Din punctul de vedere fizic, aceasta nu înseamnă nimic altceva decît că legile mecanicii nu pot fi aplicate acestor S.C.-uri că ele sînt „rele“.

Acest rezultat poate fi exprimat de (așa-numitul) *principiul relativității al lui Galileu : dacă legile mecanicii*

sînt valabile într-un S.C., ele sînt valabile în oricare alt S.C. care se mişcă uniform faţă de primul.

Dacă avem două S.C.-uri care nu se mişcă uniform unul faţă de altul, atunci legile mecanicii nu pot fi valabile în amîndouă. Sistemele de coordonate „bune", adică acelea pentru care legile mecanicii sînt valabile, se numesc *sisteme inerţiale*. Problema dacă există în fond sisteme inerţiale nu este încă tranşată. Dar dacă există un singur asemenea sistem, atunci există, implicit, o infinitate de asemenea sisteme : fiecare sistem de coordonate care se mişcă uniform faţă de un S.C. inerţial este de asemenea un S.C. inerţial.

Să considerăm cazul a două S.C.-uri care pornesc dintr-o poziţie cunoscută şi se mişcă uniform unul faţă de altul, cu viteză cunoscută. Cine preferă imaginile concrete nu are decît să-şi reprezinte un vapor sau un tren care se mişcă faţă de Pămînt. Legile mecanicii pot fi confirmate experimental cu acelaşi grad de precizie pe Pămînt, într-un tren sau pe un vapor care se mişcă uniform. Lucrurile se complică însă dacă observatorii din cele două sisteme încep să discute observarea aceluiaşi eveniment, fiecare din punctul de vedere al sistemului său de coordonate ; fiecare încearcă să traducă observaţiile celuilalt în limbajul său, propriu. Să luăm tot un exemplu simplu : una şi aceeaşi mişcare a unei particule este observată din două S.C.-uri : de pe Pămînt şi dintr-un tren în mişcare uniformă. Ele sînt amîndouă inerţiale. Se pune acum problema : admiţînd că vitezele relative şi poziţiile la un moment dat ale celor două sisteme ne sînt cunoscute, este oare de ajuns să ştim ce se observă într-un S.C. pentru a deduce ce se observă în celălalt ? Este esenţial pentru descrierea evenimentelor să ştim cum să trecem de la un S.C. la altul, dat fiind că ele sînt echivalente şi deopotrivă de capabile să descrie evenimentele din natură. Se constată că este efectiv de ajuns să cunoaştem rezultatele obţinute de un observator într-unul din cele două S.C-uri pentru a le cunoaşte pe cele obţinute de un observator în celălalt S.C.

Să tratăm problema mai abstract : fără vapor sau tren. Pentru a simplifica lucrurile ne vom referi numai la

mișcări în linie dreaptă. Avem deci o bară gradată, rigidă și un ceasornic bun, căci în cazul simplu al mișcării rectilinii bara rigidă reprezintă un S. C., ca, de exemplu, gradația de pe turnul din experiența lui Galileu. Este totdeauna mai simplu și mai indicat să ne reprezentăm un sistem de coordonate ca o bară rigidă, în cazul unei mișcări rectilinii, sau ca un grilaj rigid construit din bare paralele și perpendiculare, în cazul unei mișcări oarecari în spațiu, și să facem abstracție de turnuri, ziduri, străzi și alte obiecte asemănătoare. Prin urmare, în cazul cel

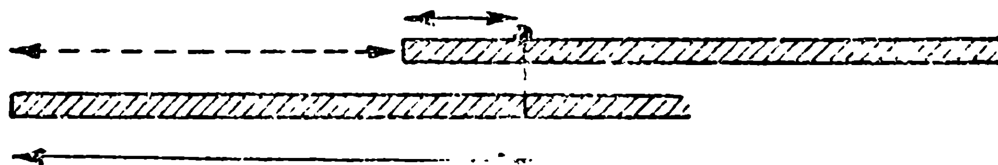


Fig. 54

mai simplu, cele două S.C.-uri vor fi reprezentate de două bare rigide ; le figurăm una sub alta și le numim S. C.-ul „de sus" și S.C.-ul „de jos". Presupunem că cele două S.C.-uri se mișcă unul față de altul cu o anumită viteză, astfel că unul lunecă în lungul celuilalt. Este bine să presupunem că amîndouă barele sînt infinit de lungi și că au repere inițiale dar n-au repere finale. Un singur ceasornic este suficient pentru cele două S.C.-uri pentru că timpul se scurge la fel în amîndouă. În momentul cînd începem observațiile, reperele inițiale ale celor două bare coincid. În acest moment poziția unui punct material este caracterizată în amîndouă S.C.-urile prin același număr. Punctul material coincide cu o diviziune a gradației de pe bară ; rezultă, astfel, un număr care determină poziția punctului material. Dar dacă barele se mișcă (uniform) una față de alta — după un anumit timp, să zicem după o secundă — numerele ce corespund pozițiilor lor vor fi diferite. Să considerăm un punct material în repaus pe bara superioară. Numărul care determină poziția lui în sistemul de coordonate superior nu variază în timp (fig. 54). Numărul corespunzător pentru bara de jos va varia însă. In loc de : „numărul ce corespunde poziției punctului" vom

spune prescurtat : *coordonata punctului.* După această precizare, vom găsi corectă şi foarte simplă următoarea propoziţie, în aparenţă încîlcită, al cărei conţinut este reprezentat în figură : coordonata unui punct în S.C.-ul de jos este egală cu coordonata lui în S.C.-ul de sus plus coordonata originii S.C.-ului de sus faţă de S.C.-ul de jos. Faptul important este că putem oricînd calcula poziţia unei particule într-un S.C. dacă ştim poziţia ei în altul. În acest scop trebuie să cunoaştem în fiecare moment, poziţia relativă a celor două sisteme de coordonate de

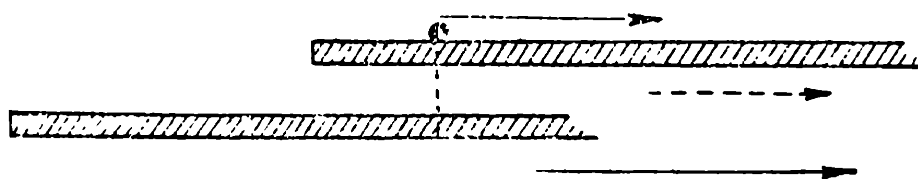


Fig. 55

care este vorba. Deşi toate acestea sună savant, în realitate ele sînt foarte simple şi aproape că n-ar merita să fie discutate în amănunt, dacă analiza aceasta nu ne-ar fi de folos mai tîrziu.

Nu este de prisos ca să arătăm deosebirea dintre determinarea poziţiei unui punct şi determinarea momentului unui eveniment. Fiecare observator are bara lui proprie care formează S.C.-ul lui, însă nu există decît un singur ceasornic pentru toţi. Timpul este ceva „absolut" care curge în acelaşi fel pentru toţi observatorii din toate S.C.-urile.

Încă un exemplu. Un om păşeşte cu o viteză de trei mile [1]) pe oră pe puntea unui vapor mare. Aceasta este viteza lui faţă de vapor sau, altfel exprimat, faţă de S.C.-ul solidar cu vaporul. Dacă viteza vaporului este de 30 mile pe oră faţă de ţărm şi dacă vitezele uniforme : a omului şi a vaporului au aceeaşi direcţie, atunci viteza omului va fi de 33 mile pe oră faţă de un observator de pe ţărm sau de 3 mile pe oră faţă de vapor. Putem formula acest fapt mai abstract : viteza unui punct material

[1] O milă marină reprezintă, aproximativ, 1852 m, iar una terestră 1610 m.

față de S.C.-ul de jos este egală cu viteza lui față de S.C.-ul de sus plus sau minus viteza S.C.-ului de sus față de S.C.-ul de jos, după cum vitezele au același sens sau sensuri opuse (fig. 55). Putem deci să transformăm întotdeauna nu numai poziții ci și viteze dintr-un S.C. în altul, dacă știm viteza relativă a celor două S.C.-uri. Pozițiile (sau coordonatele) și vitezele constituie exemple de mărimi care sînt diferite în S.C.-uri diferite, și care sînt legate între ele prin anumite *legi de transformare*, în cazul de față, foarte simple.

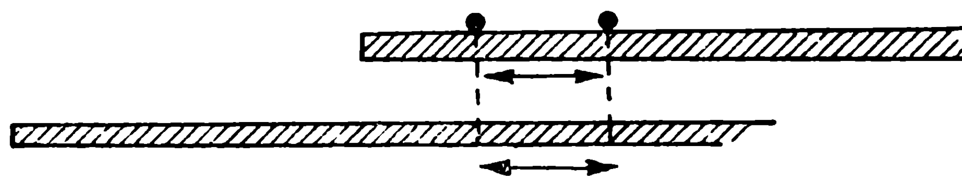


Fig. 56

Există însă cantități care sînt identice în cele două S.C.-uri și pentru care nu sînt necesare legi de transformare. Să luăm drept exemplu nu un singur punct ci două puncte fixe pe bara de sus și să considerăm distanța dintre ele (fig. 56). Această distanță este diferența dintre coordonatele celor două puncte. Pentru a găsi pozițiile a două puncte față de două S.C.-uri diferite trebuie să folosim legi de transformare. Construind însă diferența pozițiilor celor două puncte, contribuțiile datorite trecerii de la un sistem la altul se compensează și se elimină, cum se vede în figură ; căci, în total, în cursul operației de transformare a distanței celor două puncte trebuie pe de o parte să adunăm, pe de altă parte să scădem distanța dintre originile celor două S.C.-uri. În concluzie, distanța a două puncte este *invariantă*, adică independentă de alegerea sistemului de axe de coordonate.

Un alt exemplu de mărime care nu depinde de S.C. este variația vitezei, o noțiune familiară nouă din mecanică. In adevăr, dacă se observă în două S.C.-uri un punct material care se mișcă pe o dreaptă, variația vitezei acestui punct este pentru fiecare din cei doi observatori diferența a două viteze și contribuțiile datorite

mişcării relative uniforme a celor două S.C.-uri se elimină cînd se calculează diferenţa. De aceea, variaţia vitezei este un invariant, însă, bineînţeles numai cu condiţia ca mişcarea relativă a celor două S.C.-uri să fie uniformă. Altfel, variaţia vitezei ar fi diferită în cele două S.C.-uri, diferenţa provenind din variaţia vitezei mişcării relative a celor două bare ce reprezintă sistemele noastre de coordonate.

Şi acum, ultimul exemplu. Avem două puncte materiale asupra cărora acţionează forţe care depind numai de distanţă. În cazul mişcării relative rectilinii a sistemelor, distanţa dintre cele două puncte este invariantă, prin urmare, în exemplul de faţă, şi forţa. Legea lui Newton, care leagă forţa cu variaţia vitezei, va fi deci valabilă în cele două S.C.-uri. Regăsim concluzia confirmată de experienţa de toate zilele : dacă legile mecanicii sînt valabile într-un S.C., atunci ele sînt valabile în orice S.C. care se mişcă uniform unul faţă de altul. Am raţionat pe exemplul, fără îndoială foarte simplu, al mişcării rectilinii a ambelor sisteme, în care caz sistemele de axe de coordonate pot fi reprezentate prin două bare rigide. Concluziile noastre au însă valabilitate generală. Ele pot fi rezumate după cum urmează :

1. Nu cunoaştem nici o regulă pentru a găsi un sistem inerţial. Dacă ne este însă dat un sitem inerţial, putem găsi un număr infinit de asemenea sisteme, deoarece toate sistemele de coordonate care se mişcă uniform unul faţă de altul sînt inerţiale, dacă unul din ele este inerţial.

2. Timpul ce corespunde unui eveniment este acelaşi în toate S.C., dar coordonatele şi vitezele sînt diferite şi variază conform legilor de transformare.

3. Deşi coordonatele şi vitezele variază cînd trecem de la un S.C. la altul, forţa şi variaţia vitezii şi prin urmare legile mecanicii sînt invariante faţă de legile de transformare (dacă cele două S.C -uri se mişcă uniform unul faţă de altul).

Legile de transformare formulate acum pentru coordonate şi viteze le vom numi legile de transformare ale mecanicii clasice sau, mai scurt, *transformarea clasică*.

§ 26. ETERUL ȘI MIȘCAREA

Principiul relativității al lui Galileu este valabil pentru fenomenele mecanice. Aceleași legi ale mecanicii se aplică în toate sistemele inerțiale care se mișcă unul față de altul. Este valabil acest principiu și pentru fenomenele nemecanice, în particular pentru acelea la care conceptul de cîmp s-a dovedit atît de important ? Complexul de probleme grupate în jurul acestei chestiuni ne va conduce îndată la punctul de plecare al teoriei relativității.

Ne amintim că viteza luminii *în vid* sau cu alte cuvinte în eter este de 186 000 mile pe secundă (300 000 km/s) și că lumina este o undă electromagnetică care se propagă prin eter. Cîmpul electromagnetic transportă energie, care, o dată emisă de izvorul ei, are o existență autonomă. Pentru moment, vom continua să considerăm eterul drept un mediu în care se propagă unde electromagnetice și prin urmare și unde de lumină, deși sîntem pe deplin conștienți de numeroasele dificultăți cu privire la structura lui mecanică.

Să admitem că ne găsim într-o cameră închisă, izolată de lumea exterioară, astfel încît să nu poată pătrunde sau ieși de loc aer. Stînd nemișcați și vorbind, din punctul de vedere fizic, producem unde sonore emise de un izvor în repaus, care se propagă cu viteza sunetului în aer. Dacă între gură și ureche n-ar fi aer sau alt mediu material, nu am putea recepționa nici un sunet. Experiența a arătat că viteza sunetului în aer este aceeași în toate direcțiile dacă nu este vînt și dacă aerul este în repaus în sistemul de axe de coordonate ales.

Să ne închipuim acum camera noastră în mișcare uniformă în spațiu. Un observator din exteriorul ei vede prin pereții ei de sticlă (sau ai trenului dacă preferați) tot ce se petrece în interiorul camerei în mișcare. Din măsurări, observatorul din interior poate deduce viteza sunetului față de S.C.-ul său, legat de corpurile înconjurătoare, față de care camera este în mișcare. Aceasta nu este altceva decît mult discutata problemă a determinării vitezei într-un S.C. dacă o cunoaștem deacum în altul.

Observatorul din cameră declară : pentru mine viteza sunetului este aceeași în toate direcțiile.

Observatorul de afară declară : în sistemul meu de coordonate, viteza sunetului care se propagă în camera în mişcare nu este aceeaşi în toate direcţiile : în direcţia mişcării camerei, ea este mai mare decît viteza normală a sunetului, iar în direcţia opusă, mai mică.

Aceste concluzii decurg din transformarea de coordonate clasică și pot fi confirmate de experiență. Întrucît camera antrenează cu ea mediul material în care se propagă undele sonore, adică aerul, viteza sunetului va fi diferită pentru observatorul din interior și pentru cel din exterior.

Putem trage și alte concluzii din teoria care consideră sunetul o undă ce se propagă într-un mediu material. Un mijloc de a nu auzi ce spune cineva, deși nu cel mai simplu, este de a alerga cu o viteză mai mare decît sunetul față de aerul care îl înconjură pe cel care vorbeşte. În condiţiile acestea, undele sonore emise nu vor putea niciodată ajunge la urechea noastră.

De asemenea, dacă n-am auzit un cuvînt important care nu va fi repetat, l-am putea totuși prinde : n-am avea decît să alergăm cu viteză mai mare decît a sunetului, ajungînd astfel din urmă unda emisă.

Nici unul din aceste două exemple nu conține nimic nerațional, cu excepția faptului că în amîndouă cazurile ar trebui să alergăm cu o viteză de aproape 350 m/s. Putem admite foarte bine că progresul tehnicii va face accesibilă această viteză. Un obuz aruncat dintr-un tun se mișcă efectiv cu o viteză mai mare decît a sunetului și un om călare pe un asemenea obuz nu ar auzi niciodată zgomotul împușcăturii.

Dat fiind că toate aceste exemple au un caracter pur mecanic, este cazul să formulăm acum următoarea întrebare importantă : putem oare repeta, în cazul unei unde de lumină, ceea ce am spus mai sus cu privire la unda sonoră ? Principiul relativității al lui Galileu și transformarea clasică se aplică în egală măsură fenomenelor optice și electrice ca și celor mecanice ? Ar fi

riscant să răspundem la aceste întrebări pur și simplu printr-un „da" sau „nu" fără a le analiza semnificația.

În cazul undei sonore emise în camera care se mișca uniform față de observatorul din exteriorul ei, concluzia noastră s-a bazat pe două premize esențiale:

Camera în mișcare antrenează aerul în care se propagă unda sonoră.

Vitezele observate în două S.C.-uri care se mișcă uniform unul față de altul sînt legate prin transformarea clasică de coordonate.

Problema corespunzătoare pentru lumină trebuie însă formulată într-un mod puțin diferit: observatorii din cameră nu vorbesc, ci emit, în toate direcțiile, semnale luminoase, adică unde de lumină. Vom mai presupune că izvoarele semnalelor luminoase sînt în repaus permanent în cameră și că undele de lumină înaintează prin eter întocmai ca sunetul în aer.

Este eterul antrenat de cameră întocmai ca și aerul? Deoarece nu ne-am putut face nici o reprezentare mecanicistă a eterului, este extrem de greu să răspundem la această întrebare. Dacă încăperea este închisă, aerul din interiorul ei este silit să se deplaseze împreună cu ea. Evident, nu are nici un sens să tratăm eterul în același mod, deoarece materia este toată cufundată în el și el pătrunde peste tot. Nu există ușă închisă pentru eter. În cazul acesta, „camera în mișcare" ar reprezenta numai un sistem de coordonate solidar cu izvorul de lumină. Totuși, nu este absurdă nici presupunerea că eterul ar fi antrenat de camera ce se mișcă împreună cu izvorul de lumină, în modul în care izvorul de sunete și aerul fuseseră antrenate de camera închisă. Putem însă admite cu aceeași îndreptățire și contrariul: camera călătorește prin eter întocmai ca un vapor pe o mare fără valuri, fără a antrena nici o părticică din mediu, ci numai străbătîndu-l. În prima noastră ipoteză, camera în mișcare cu izvorul ei de lumină antrenează eterul. Analogia cu unda sonoră este posibilă și se pot trage concluzii asemănătoare. În cea de a doua ipoteză, camera în mișcare împreună cu izvorul de lumină nu antrenează eterul. Nu este posibilă nici o analogie cu unda sonoră și concluziile deduse în ca-

zul undelor sonore nu sînt valabile pentru undele de lumină. Acestea sînt cele două posibilități extreme. Am putea imagina posibilități mai complicate, intermediare, presupunînd că eterul este antrenat numai parțial de camera care se mișcă cu izvorul de lumină. Nu are însă nici un sens să discutăm presupunerile mai complicate înainte de a stabili în favoarea căruia din cele două cazuri limită se pronunță experiența.

Vom începe cu prima noastră ipoteză și vom presupune mai întîi că eterul este antrenat de camera care se mișcă, izvorul fiind solidar cu ea. În aceste condiții, dacă admitem valabilitatea principiului simplu de transformare a vitezelor undelor sonore, putem aplica și undelor de lumină concluziile noastre. Or, nu avem nici o rațiune să punem la îndoială exactitatea legilor simple de transformare din mecanică, ce afirmă numai că vitezele trebuie însumate în unele cazuri și scăzute în altele. Pentru moment, să admitem, totuși, atît că eterul este antrenat de camera care se mișcă, uniform, împreună cu izvorul ei, cît și valabilitatea transformării clasice.

Aprind lumina ; de la izvorul solidar cu încăperea mea pornește un semnal luminos a cărui viteză are binecunoscuta valoare experimentală de 300 000 km/s. Observatorul exterior va înregistra mișcarea camerei și implicit a sursei, și cum eterul este antrenat de cameră, concluzia lui va fi că viteza luminii în S.C.-ul său exterior, este diferită în direcții diferite și anume : în direcția de mișcare a camerei este mai mare decît viteza normală a luminii iar în direcția opusă, mai mică. În concluzie : dacă eterul este antrenat de camera care se mișcă cu izvorul ei de lumină și dacă legile din mecanică sînt valabile, atunci viteza luminii trebuie să depindă de viteza izvorului de lumină. Lumina care ajunge la ochiul nostru venind de la un izvor de lumină în mișcare ar trebui să aibă o viteză mai mare sau mai mică, după cum izvorul se apropie sau se îndepărtează de noi.

Dacă viteza noastră ar fi mai mare decît cea a luminii am putea, de exemplu, să fugim din calea unui semnal de lumină. De asemenea, am putea asista la evenimente din trecut, ajungînd din urmă undele de lumină emise

anterior. Întrucît le-am prinde din urmă în ordinea inversă celei în care fuseseră ele emise, succesiunea întîmplărilor de pe Pămînt ne-ar apărea ca într-un film rulat invers, începînd cu sfîrşitul. Aceste concluzii decurg toate din presupunerea că S.C.-ul în mişcare antrenează eterul și că legile de transformare din mecanică sînt valabile. Dacă este într-adevăr așa, analogia dintre lumină și sunet este perfectă.

Totuşi, nu există nici o indicație care să confirme exactitatea acestor concluzii. Dimpotrivă, ele sînt contrazise de toate observațiile întreprinse în scopul de a le dovedi. Nu există nici cea mai mică îndoială cu privire la caracterul categoric al acestui verdict deși el a fost dobîndit prin experiențe cam indirecte, date fiind marile dificultăți tehnice determinate de valoarea enormă a vitezei luminii. *Viteza luminii este întotdeauna aceeași în toate S.C.-urile, indiferent dacă sursa emițătoare se mișcă și indiferent cum se mișcă.*

Nu vom intra în descrierea amănunțită a numeroaselor experiențe care au condus la această concluzie importantă. Putem totuși prezenta unele argumente foarte simple care, chiar dacă nu demonstrează că viteza luminii este independentă de mişcarea sursei sale, fac totuși plauzibil și inteligibil acest fapt.

În sistemul nostru planetar, Pămîntul și celelalte planete se mișcă în jurul Soarelui. Nu avem cunoștință de existența altor sisteme planetare asemănătoare cu al nostru. Cunoaștem în schimb foarte multe sisteme de stele duble, care constau din două stele ce se rotesc în jurul unui același punct numit centrul lor de greutate. Observarea mișcării acestor stele duble confirmă valabilitatea legii gravitației a lui Newton. Să presupunem acum că viteza luminii depinde de viteza corpului care o emite. Atunci mesajul trimis de stea, adică raza de lumină emisă de ea, ar călători mai repede sau mai încet după viteza pe care o are steaua în momentul emisiunii. În aceste condiții, întreaga mișcare ar apărea difuză și ne-ar fi imposibil să confirmăm, în cazul unor stele duble îndepărtate, valabilitatea legilor gravitaționale care guvernează sistemul nostru planetar.

Să considerăm o a doua experiență care se bazează pe o idee foarte simplă. Să ne imaginăm o roată care se învîrte foarte repede. Potrivit ipotezei noastre, eterul este antrenat în mișcare și ia parte la ea. O rază de lumină care trece pe lîngă periferia roții nu va avea aceeași viteză cînd roata este în repaus și cînd ea este în mișcare. Viteza luminii în eterul în repaus ar fi diferită de aceea în eterul antrenat rapid de mișcarea roții, după cum viteza unei unde sonore nu este aceeași în zile calme și în zile cu vînt. Dar, nici o asemenea diferență nu a putut fi pusă în evidență. Indiferent din ce unghi de vedere atacăm acest subiect și indiferent ce experiență crucială am imagina, sentința se rostește întotdeauna împotriva presupunerii că eterul este antrenat de mișcare. Ca atare, concluzia considerațiilor noastre, sprijinită pe argumente mai amănunțite și mai tehnice este :

Viteza luminii nu depinde de mișcarea sursei care o emite. Presupunerea că eterul este antrenat de corpurile în mișcare nu corespunde realității.

Trebuie dar să părăsim analogia dintre undele sonore și cele de lumină și să luăm în considerare a doua posibilitate : că toată materia se mișcă prin eter, iar acesta nu ia parte cîtuși de puțin la mișcare. Aceasta revine la a presupune că există o mare de eter față de care toate S.C.-urile sînt în repaus sau în mișcare. Presupunem că părăsim, pentru un moment, problema dacă experiența confirmă sau dezminte această teorie. Voim mai curînd să ne familiarizăm cu semnificația acestei noi ipoteze și cu concluziile care decurg din ea.

Am admis deci că ar exista un S.C. în repaus față de marea de eter imobilă. În mecanică nu putusem individualiza nici unul din multele S.C.-uri în mișcare uniformă unul față de altul. Ele erau toate, fie deopotrivă de „bune“, fie deopotrivă de „rele“. În mecanică, dacă avem două S.C.-uri care se mișcă uniform unul față de celălalt, întrebarea care dintre ele este în mișcare și care în repaus nu are nici o semnificație : singurul lucru care se poate observa este mișcarea lor relativă. Potrivit principiului relativității al lui Galileu nu putem vorbi de mișcare uniformă absolută. Dar ce semnificație are în fond afirmația

că există o mișcare uniformă *absolută* și nu numai una *relativă?* Pur și simplu că există un S.C. în care unele din legile naturii au altă formă decît în toate celelalte sisteme ; de asemenea că fiecare observator poate stabili dacă S.C.-ul lui este în repaus sau în mișcare uniformă, comparînd legile valabile în el cu cele valabile în sistemul unic, care are monopolul absolut de a servi drept S.C. standard. Situația aceasta este diferită de aceea din mecanica clasică, unde din cauza legii inerției a lui Galileu, mișcarea uniformă absolută este cu totul lipsită de semnificație.

Ce concluzie poate fi trasă în domeniul fenomenelor de cîmp dacă se admite ipoteza mișcării prin eter? Aceasta ar însemna că există un S.C. deosebit de toate celelalte, în repaus față de marea de eter. Este limpede că unele din legile naturii ar trebui să fie diferite în acest S.C., altminteri expresia „mișcarea prin eter" ar fi lipsită de sens.

Dacă este valabil principiul relativității al lui Galileu, atunci mișcarea prin eter este lipsită de semnificație. Este imposibil să punem de acord aceste două idei. Am admis, totuși, că există un S.C. privilegiat, fixat de eter, prin urmare, implicit, că „mișcarea uniformă absolută" și „repausul absolut" au o semnificație obiectivă.

Nu avem de fapt nici o alegere. Încercăm să salvăm principiul relativității al lui Galileu, presupunînd că sistemele antrenează eterul în mișcarea lor, dar aceasta conduce la o contrazicere cu experiența. Nu ne rămîne decît să părăsim acest principiu al relativității și să vedem ce rezultă din presupunerea că toate corpurile în mișcare străbat o mare de eter imobilă.

Pasul următor pe care-l facem este să considerăm unele concluzii cari contrazic principiul relativității al lui Galileu și concordă cu teza mișcării prin eter, și să le confruntăm cu experiența. Experiențele corespunzătoare sînt destul de ușor de imaginat, dar foarte greu de efectuat. Deoarece dezbatem aici numai idei, nu este nevoie să ne preocupăm de dificultățile tehnice.

Să ne întoarcem din nou la camera în mișcare și la cei doi observatori, cel din interiorul camerei și cel din

exteriorul ei. Observatorul din exterior va considera S.C.-ul standard legat de marea de eter. Este vorba de S.C.-ul privilegiat în care viteza luminii are întotdeauna aceeaşi valoare standard. Lumina emisă de orice sursă se propagă cu aceeaşi viteză, indiferent dacă sursa este în mişcare sau în repaus faţă de marea de eter. Să admitem că în timp ce camera şi observatorul din interiorul ei străbat eterul, în centrul camerei se aprinde şi se stinge fulgerător o lumină. Să mai admitem că pereţii camerei sînt transparenţi astfel că observatorii, atît cel din interior cît şi cel din afară, pot măsura viteza luminii. Întrebîndu-l acum pe fiecare în parte, care este rezultatul aşteptat de el, răspunsurile ar suna cam astfel :

Observatorul din exterior : S.C.-ul meu este indicat de către marea de eter. În S.C.-ul meu, viteza luminii are întotdeauna valoarea standard. Nu mă interesează dacă izvorul de lumină sau alte corpuri sînt în mişcare pentru că ele nu antrenează niciodată marea de eter. S.C.-ul meu este privilegiat faţă de celelalte, în el viteza luminii trebuie să aibă valoarea standard, indiferent de direcţia razei de lumină sau de mişcarea izvorului care o emite.

Observatorul din interior : camera mea străbate eterul. Unul din pereţii ei se îndepărtează de lumină, cel opus se apropie de ea. Dacă încăperea mea s-ar deplasa faţă de marea de eter cu viteza luminii, atunci lumina emisă din centrul camerei nu ar atinge niciodată peretele, care se îndepărtează cu viteza luminii. Dacă încăperea ar înainta cu o viteză mai mică decît aceea a luminii, atunci o undă emisă din centrul ei ar atinge unul din cei doi pereţi înaintea celuilalt. Peretele care se mişcă spre lumină ar fi atins mai devreme, decît cel care se îndepărtează de lumină. De aceea, deşi izvorul de lumină este solidar cu S.C.-ul meu, viteza luminii nu va fi aceeaşi în toate direcţiile. Ea va fi mai mică în direcţia de mişcare relativă în raport cu marea de eter, întrucît peretele corespunzător fuge din calea luminii, şi mai mare în direcţia opusă, întrucît peretele opus vine în întîmpinarea undei.

Prin urmare, viteza luminii va fi aceeaşi în toate direcţiile, numai într-un S.C. legat de marea de eter. Pentru

alte S.C.-uri care se mișcă față de marea de eter ea va depinde de direcția în care este măsurată.

Experiența crucială discutată mai sus ne dă posibilitatea să verificăm teoria mișcării față de marea de eter. În adevăr, natura ne pune la dispoziție un sistem care se deplasează cu o viteză destul de mare, Pămîntul în mișcarea lui de revoluție în jurul Soarelui. Dacă ipoteza noastră este corectă, atunci în direcția de mișcare a Pămîntului, viteza luminii va avea altă valoare decît în direcția opusă. Diferența poate fi calculată și se poate concepe o experiență de verificare adecuată. Dată fiind micimea diferențelor de timp prevăzute de teorie, a fost nevoie să se imagineze dispozitive experimentale foarte ingenioase, între altele, în cadrul vestitei experiențe a lui *Michelson* și *Morley*. Rezultatul acestei experiențe a însemnat condamnarea la moarte a teoriei mării liniștite de eter pe care ar străbate-o materia în mișcarea ei. Nu s-a putut stabili nici o dependență de direcție a vitezei luminii. Dar, potrivit teoriei eterului, nu numai viteza luminii, ci și alte fenomene de cîmp ar trebui să prezinte o dependență de direcție în S.C.-ul în mișcare. Toate experiențele au dat același rezultat negativ ca experiența *Michelson-Morley* ; nici una din ele nu a putut pune în evidență dependența vreunui fenomen de direcția mișcării Pămîntului.

Situația devenea din ce în ce mai critică. Au fost încercate două ipoteze. Prima, că eterul este antrenat de corpurile în mișcare. Această ipoteză este contrazisă de faptul că viteza luminii nu depinde de mișcarea izvorului. A doua, că există un sistem de coordonate privilegiat și că în mișcarea lor corpurile nu antrenează eterul, ci străbat o mare de eter în permanență calmă. Dar în cazul acesta principiul relativității al lui Galileu nu mai este valabil, iar viteza luminii nu poate fi aceeași în orice S.C., și din nou sîntem în contrazicere cu experiența.

S-au propus teorii, mai artificiale, care presupuneau că adevărul este undeva la mijloc între aceste două cazuri extreme : că eterul ar fi antrenat numai parțial de corpurile în mișcare. Dar toate au dat greș ! Toate încercările de a explica fenomenele electromagnetice în S.C.-ul

în mişcare, fie cu ajutorul mişcării eterului, fie cu ajutorul mişcării prin eter sau cu ajutorul ambelor mişcări nu au avut succes.

S-a creat astfel una din cele mai dramatice situaţii din istoria ştiinţei. Nici una din ipotezele privitoare la eter n-a avut succes ; verdictul experimental a fost de fiecare dată negativ. Aruncînd o privire retrospectivă asupra dezvoltării fizicii constatăm că eterul, curînd după naşterea lui, s-a afirmat ca un „enfant terrible" al familiei substanţelor fizice. Mai întîi, construirea unei imagini mecanice simple a eterului s-a dovedit a fi imposibilă şi a fost părăsită. Faptul acesta a provocat, în mare măsură, falimentul punctului de vedere mecanicist şi, în al doilea rînd, am fost nevoiţi să renunţăm la speranţa de a putea individualiza, ca urmare a existenţei mării de eter imobile, un sistem privilegiat care să permită identificarea mişcării absolute uniforme. Acesta ar fi fost singurul mod în care eterul ar fi putut să-şi manifeste şi să-şi justifice existenţa şi altfel decît ca purtător de unde. Toate încercările noastre de a da un caracter real eterului au eşuat. El nici nu şi-a dat în vileag structura lui mecanică, nici n-a dus la identificarea mişcării absolute. Din toate proprietăţile eterului, nu s-a menţinut decît una singură, cea pentru care fusese inventat, adică proprietatea de a transmite unde electromagnetice. Încercările noastre de a stabili proprietăţile eterului au condus la dificultăţi şi contraziceri. După asemenea experienţe dezagreabile a sosit momentul să dăm cu desăvîrşire uitării eterul şi să încercăm să nu-i mai pronunţăm numele. De acum înainte vom spune : spaţiul nostru are proprietatea fizică de a transmite unde, ocolind întrebuinţarea unui cuvînt pe care ne-am propus să-l evităm.

Fireşte că suprimarea unui cuvînt din vocabularul nostru nu constituie un remediu. Complicaţiile noastre sînt în realitate mult prea grave pentru a putea fi lichidate în felul acesta !

Să consemnăm acum faptele care ne-au fost confirmate suficient de experienţă fără a ne mai preocupa de aici înainte de problema „e——r"-ului.

1. Viteza luminii în vid are întotdeauna valoarea standard, indiferent de mişcarea sursei sau a observatorului.

2. Orice lege a naturii este absolut identică în două S.C.-uri în mişcare uniformă unul față de altul și nu există nici un mijloc de a identifica mișcarea uniformă și absolută.

Există multe experiențe care confirmă aceste două propoziții și nici una care să le contrazică. Prima afirmație exprimă constanța vitezei luminii, a doua generalizează, pentru toate fenomenele din natură, principiul relativității al lui Galileu, formulat pentru fenomenele mecanice.

În mecanică am văzut că, dacă viteza unui punct material are o valoare anumită față de un S.C., ea va avea altă valoare în alt S.C., în mişcare uniformă față de primul. Aceasta decurge din legile simple ale transformării din mecanică. Ele ne sînt date imediat de intuiția noastră (mişcarea unui om în raport cu un vapor sau cu țărmul) și, evident, nu pot conține nimic greşit. Dar această transformare contrazice caracterul constant al vitezei luminii. Cu alte cuvinte, adăugăm un al treilea principiu :

3. Pozițiile și vitezele se transformă dintr-un sistem inerțial în altul, în concordanță cu transformarea clasică.

Contradicția este evidentă. Nu se poate combina 1 cu 2 și cu 3.

Transformarea clasică pare prea evidentă și prea simplă pentru a avea sens ca să o modificăm. Propozițiile de la 1 și 2 am încercat să le modificăm și am ajuns la o contrazicere cu experiența : toate teoriile privitoare la mișcarea „e——r"ului ceruseră modificarea lui 1 și 2, ceea ce n-a dus la ceva bun. Constatăm din nou caracterul serios al dificultăților noastre. Avem nevoie de un nou fir conducător. El ne este furnizat de *acceptarea ipotezelor fundamentale 1 și 2* și, oricît de straniu ne-ar părea, *de părăsirea ipotezei 3.* Această nouă concepție pornește de la analiza noțiunilor fundamentale și primitive ; vom arăta cum această analiză ne constrînge să ne schimbăm concepțiile noastre vechi și înlătură toate dificultățile.

§ 27. DURATĂ, DISTANȚĂ, RELATIVITATE

Noile noastre ipoteze sînt :

1. *În vid, viteza luminii este aceeași în orice S.C. care se mișcă uniform unul față de altul.*

2. *Orice lege a naturii este identică în toate S.C.-urile care se mișcă uniform unul față de altul.*

Cu aceste două ipoteze am pășit pe terenul *teoriei relativității*. De acum înainte nu vom mai folosi transformarea clasică deoarece știm că ea contrazice ipotezele noastre.

În problema aceasta, și în general în știință, este esențial să ne eliberăm de idei preconcepute, adînc înrădăcinate, repetate deseori fără a le supune unui examen critic. Deoarece am văzut că modificarea ipotezelor 1 sau 2 conduce la contraziceri cu experiența, trebuie să avem curajul să postulăm în mod categoric valabilitatea lor și să atacăm singurul punct slab posibil : modul în care se transformă pozițiile și vitezele cînd trecem de la un S.C. la altul. Ne propunem acum să tragem concluzii din 1 și 2, să vedem unde și cum se contrazic aceste ipoteze cu transformarea clasică și să găsim sensul fizic al rezultatelor obținute.

Ne vom servi din nou de exemplul cu camera în mișcare și cu cei doi observatori, cel din exterior și cel din interior. Vom presupune din nou că în centrul camerei se emite un semnal luminos și vom întreba din nou pe cei doi observatori ce se așteaptă ei să observe, dacă admit numai cele două principii, uitînd tot ce s-a spus mai înainte cu privire la mediul prin care se propagă lumina. Citām răspunsurile lor :

Observatorul din interior : Semnalul luminos, pornind din centrul camerei, va atinge cei doi pereți *simultan,* deoarece ei sînt la aceeași distanță de izvorul de lumină, iar viteza luminii este aceeași în toate direcțiile.

Observatorul din exterior : În sistemul meu, viteza luminii este exact aceeași ca în cel al observatorului care se mișcă o dată cu camera. Nu interesează dacă izvorul de lumină se mișcă sau nu în S.C.-ul meu, deoarce mișcarea lui nu influențează viteza luminii. Semnalul luminos

pe care-l înregistrez înaintează cu viteza standard, care este aceeași în toate direcțiile. Unul din pereți fuge din calea semnalului luminos, iar peretele opus vine în întîmpinarea lui. De aceea, peretele care se îndepărtează va primi semnalul puțin mai tîrziu decît cel care se apropie. Deși diferența va fi foarte mică, dacă viteza camerei este mică față de cea a luminii, totuși semnalul luminos nu va ajunge chiar simultan la cei doi pereți opuși, perpendiculari pe direcția mișcării.

Comparînd prezicerile celor doi observatori, ajungem la un rezultat uimitor, care contrazice în mod flagrant conceptele în aparență bine întemeiate ale fizicii clasice. Două evenimente, adică atingerea celor doi pereți de către două raze de lumină, sînt simultane pentru observatorul din interior, nu însă și pentru observatorul din exterior. În fizica clasică aveam un singur ceasornic, o singură scurgere a timpului pentru toți observatorii din toate S.C.-urile. Timpul și prin urmare termenii „simultan", „anterior", „posterior" aveau o semnificație absolută, independentă de orice S.C. Două evenimente care se produceau în același timp într-un S.C. se produceau în mod obligatoriu simultan în toate celelalte S.C.-uri.

Ipotezele 1 și 2, adică teoria relativității, ne constrîng să părăsim acest punct de vedere. Am descris exemplul a două evenimente care într-un S. C. se produc în același timp și în alt S.C., la momente diferite. Sarcina noastră actuală este să înțelegem această consecință, să înțelegem semnificația afirmației : „este posibil ca două evenimente simultane într-un S.C., să nu fie simultane în alt S.C."

Ce înțelegem prin „două evenimente simultane într-un S.C." ? Intuitiv, fiecare din noi are impresia că înțelege această afirmație. Dar să încercăm a fi precauți, să încercăm să dăm definiții riguroase, căci știm cît de primejdios este să supraestimăm intuiția noastră. Să răspundem întîi la o întrebare simplă.

Ce este un ceasornic ?

Senzația primară subiectivă de scurgere a timpului ne dă posibilitatea să ne ordonăm impresiile, să apreciem

dacă un eveniment s-a produs înaintea altuia sau după el. Dar pentru a stabili că intervalul dintre două evenimente este de exemplu de 10 secunde, avem nevoie de un ceasornic. Prin folosirea ceasornicului, noţiunea de timp devine obiectivă. Orice fenomen fizic poate îndeplini funcţiunea de ceasornic cu condiţia de a putea fi reprodus în mod identic ori de cîte ori dorim. Luînd ca unitate de timp intervalul dintre începerea şi terminarea unui astfel de eveniment, se pot măsura intervale de timp arbitrare, prin repetarea acestui proces fizic. Toate ceasornicele, începînd de la cel cu nisip şi pînă la instrumentele cele mai perfecţionate, se bazează pe acest principiu. În cazul ceasornicului cu nisip, unitatea de timp este intervalul în care se scurge nisipul din rezervorul de sus în cel de jos. Acest proces fizic poate fi repetat întorcînd ceasornicul.

În două puncte distanţate unul de altul vom considera două ceasornice perfecte, care indică exact aceeaşi oră. Vrem ca această afirmaţie să rămînă în picioare oricît de mare ar fi precizia cu care am verifica-o. Dar ce înseamnă ea în realitate ? Cum am putea să ne asigurăm că cele două ceasornice, distanţate, indică exact aceeaşi oră ? Am putea, de exemplu, să folosim televiziunea. Să fim însă lămuriţi că televiziunea reprezintă numai un procedeu posibil şi nu este esenţială pentru raţionamentul nostru. Am putea deci să ne situăm aproape de unul din ceasornice privind imaginea televizată a celuilalt. În felul acesta am putea aprecia dacă ele indică aceeaşi oră în mod simultan. Dar criteriul acesta nu ar fi corect. Imaginea televizată fiind transmisă prin unde electromagnetice, se propagă cu viteza luminii. Televiziunea ne furnizează deci o imagine emisă cu foarte puţin timp mai devreme, în timp ce pe ceasornicul real am vedea ceea ce se întîmplă chiar în momentul respectiv. Această dificultate poate fi însă înlăturată. Este de ajuns să recepţionăm imaginile televizate ale celor două ceasornice, într-un punct situat la o distanţă egală de amîndouă. Atunci, dacă semnalele sînt emise simultan, vor sosi tot simultan. Dacă două ceasornice bune, observate de la jumătatea distanţei dintre ele, vor arăta mereu acelaşi timp atunci ele sînt

apte să indice timpul a două evenimente care se produc în două puncte depărtate unul de altul.

În mecanică ne-am folosit de un singur ceasornic. Dar situația aceasta nu era prea comodă, deoarce eram nevoiți să facem toate măsurătorile în imediata vecinătate a acestui unic ceasornic. Citind indicația unui ceasornic de la distanță, de exemplu prin televiziune, nu trebuie să pierdem din vedere faptul că ceea ce vedem la un moment dat, în realitate s-a petrecut mai devreme, după cum urmărind un apus de Soare înregistrăm în fiecare moment un eveniment care are loc cu 8 minute mai devreme. Trebuie deci să corectăm toate lecturile timpului citit, ținînd seama de distanța pînă la ceasornic.

De aceea nu este comod să avem un singur ceasornic, Acum, însă, cînd știm cum să apreciem dacă două sau mai multe ceasornice indică același timp în mod simultan precum și dacă merg în același ritm, putem foarte bine să ne imaginăm cîte ceasornice vrem într-un S.C. dat. Fiecare din ele ne va ajuta să determinăm timpul evenimentelor care se petrec în imediata lui apropiere. Ceasornicele sînt toate în repaus față de S.C. Ele sînt ceasornice „bune" și sînt *sincronizate*, adică toate indică simultan aceeași oră.

Așezarea ceasornicelor noastre nu conține nimic prea izbitor sau bizar.

Vom folosi acum mai multe ceasornice sincronizate în locul unuia singur și, ca atare, vom putea aprecia mai ușor dacă două evenimente depărtate sînt sau nu simultane într-un S.C. dat. Ele sînt simultane dacă ceasornicele sincronizate situate în vecinătatea lor indică același timp în momentul în care au loc evenimentele. Acum, afirmația că unul din evenimentele îndepărtate se produce înaintea celuilalt, are cu adevărat o semnificație definită. Toate acestea pot fi stabilite cu ajutorul ceasornicelor sincronizate, în repaus față de S.C.-ul nostru.

Cele de mai sus sînt în concordanță cu fizica clasică ; pînă în prezent nu a intervenit ceva care să contrazică transformarea clasică.

Pentru definirea unor evenimente simultane, ceasornicele sînt sincronizate cu ajutorul semnalelor. Este

esenţial pentru dispozitivul nostru că aceste semnale înaintează cu viteza luminii, viteză care joacă un rol atît de fundamental în teoria relativităţii.

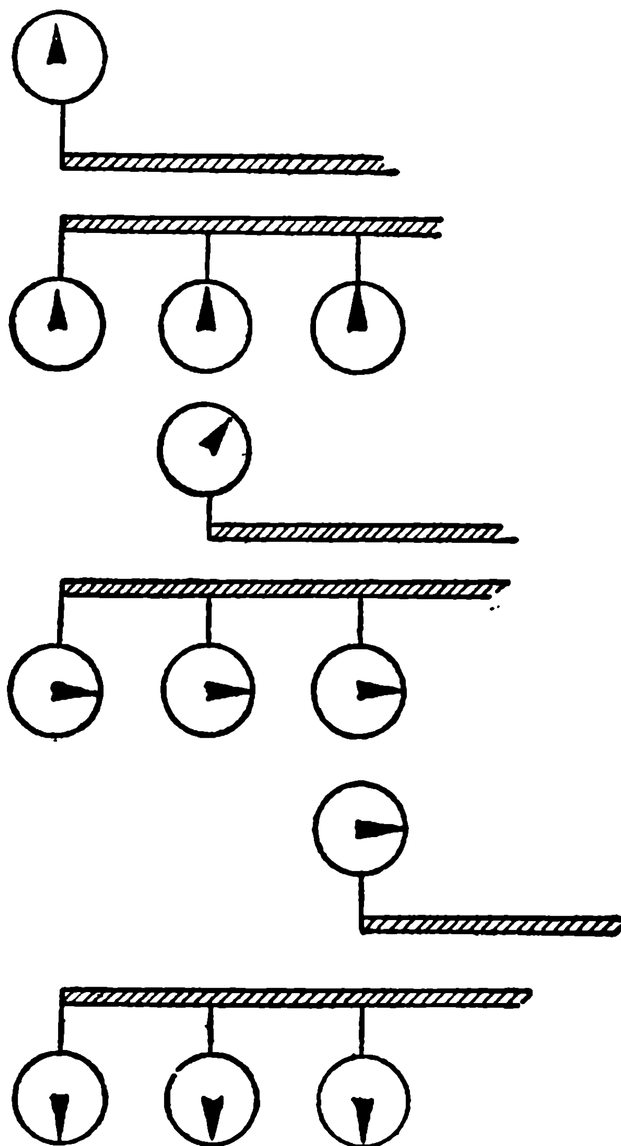
Deoarece intenţionăm să ne ocupăm de problema importantă a mişcării relative uniforme a două S.C., vom considera două bare prevăzute fiecare cu ceasornice. În fiecare din cele două S.C.-uri care se mişcă unul faţă de altul, observatorul are bara sa proprie şi ansamblul lui propriu de ceasornice solidare cu bara.

În mecanica clasică, de cîte ori a fost vorba de o măsurătoare, ne-am folosit de un singur ceasornic pentru toate S.C. Aici avem multe ceasornice în fiecare S.C. Diferenţa aceasta nu este însă esenţială. Un ceasornic ne-ar fi fost suficient, dar nimeni nu poate să ridice vreo obiecţie împotriva folosirii mai multor ceasornice, cîtă vreme ele se comportă cum se cuvine unor ceasornice bine sincronizate.

Ne-am apropiat acum de punctul esenţial arătînd în ce privinţă transformarea clasică este în contradicţie cu teoria relativităţii. Ce se întîmplă dacă două grupuri de ceasornice se mişcă uniform unul faţă de altul ? Fizicianul clasic ar răspunde : nimic ; ele au acelaşi ritm şi timpul poate fi indicat tot atît de corect de un ceasornic în mişcare sau în repaus. Potrivit fizicii clasice, două evenimente simultane într-un S.C. vor fi simultane în oricare alt S.C.

Dar acesta nu este singurul răspuns posibil. Ne putem imagina tot atît de bine că un ceasornic în mişcare are un ritm diferit de cel al unui ceasornic în repaus. Să discutăm această posibilitate fără a stabili încă dacă în realitate ceasornicele îşi schimbă sau nu ritmul datorită mişcării. Ce se înţelege prin afirmaţia că un ceasornic îşi schimbă ritmul datorită mişcării ? Pentru simplicitate să presupunem că în S.C.-ul superior avem un singur ceasornic şi în cel inferior, mai multe (fig. 57). Toate ceasornicele au aceleaşi mecanisme şi cele de jos sînt sincronizate, adică arată acelaşi timp simultan. Am figurat trei poziţii consecutive ale celor două S.C.-uri în mişcare unul faţă de altul. În prima figură, prin convenţie, arătătoarele cesornicelor de sus şi de jos au aceeaşi

poziție, pentru că așa le-am potrivit noi : toate ceasornicele indică același timp. Poziția a doua ne arată dispoziția relativă a celor două S.C.-uri puțin mai tîrziu. În S.C.-ul de jos, toate ceasornicele arată același timp, dar ceasornicul din S.C.-ul de sus și-a schimbat ritmul. Ritmul lui s-a schimbat și timpul pe care-l indică este altul din cauză că ceasornicul se mișcă față de S.C.-ul de jos. În poziția a treia vedem cum diferența dintre indicațiile arătătoarelor a crescut cu timpul.


Fig. 57

Un observator în repaus în S.C.-ul de jos va constata că un ceasornic în mișcare își schimbă ritmul. Evident, un observator în repaus în S.C.-ul de sus, dispunînd de mai multe ceasornice, ar stabili aceeași modificare a ritmului pentru un ceasornic solidar cu S.C.-ul de jos. Legile naturii trebuie să fie identice în amîndouă S.C., în mișcare uniformă unul față de altul.

În mecanica clasică s-a admis tacit că un ceasornic în mișcare nu-și schimbă ritmul. Lucrul acesta părea atît de evident încît se considera că nici nu este necesar să fie menționat. Nimic nu trebuie însă considerat prea evident ; dacă vrem să fim cu adevărat precauți trebuie să analizăm și acele ipoteze pe care, pînă la această dată, fizica le considerase în afară de discuție.

O ipoteză nu trebuie considerată absurdă pentru simplul motiv că nu concordă cu fizica clasică. Putem

foarte bine admite că un ceasornic în mişcare îşi schimbă ritmul cîtă vreme legea acestei variaţii este aceeaşi pentru toate sistemele inerţiale.

Încă un exemplu. Să luăm o măsură de un metru, adică, un baston ce are un metru cînd este în repaus într-un S.C. Să presupunem acum că el începe să se mişte uniform, lunecînd în lungul barei care reprezintă S.C.-ul. Va rămîne lungimea lui tot de un metru ? Pentru a răspunde, trebuie mai întîi să ştim să determinăm această lungime. Cîtă vreme bastonul era în repaus, capetele lui coincideau cu două repere distanţate la un metru în S.C. De aici, dedusesem că în repaus lungimea lui era de un metru. Cum trebuie să procedăm acum pentru a măsura bastonul în timpul mişcării ? S-ar putea proceda astfel : la un moment dat doi observatori fac simultan două fotografii instantanee, unul a originii, celălalt a extremităţii barei. Deoarece imaginile sînt luate simultan, din compararea reperelor din S.C., care coincid cu originea, respectiv cu extremitatea bastonului în mişcare, rezultă lungimea lui. Pentru a înregistra două evenimente care se produc simultan, în două puncte diferite ale unui S.C. dat, sînt necesari doi observatori. Nu există deci nici o raţiune pentru a admite a priori că rezultatul unor asemenea măsurări va fi acelaşi ca în cazul cînd bara era în repaus. Întrucît fotografiile trebuie luate simultan, ceea ce, după cum ştim, este o noţiune relativă depinzînd de S.C., se prea poate ca rezultatul acestor măsurări să nu fie acelaşi în două S.C.-uri, care se mişcă unul faţă de celălalt.

Ne putem foarte bine imagina nu numai că ceasornicul în mişcare îşi schimbă ritmul, ci că şi bara în mişcare îşi schimbă lungimea, cu condiţia ca legile de variaţie să fie aceleaşi pentru toate S.C.-urile inerţiale.

Am enunţat unele posibilităţi noi fără a le justifica în vreun fel.

Amintim că viteza luminii este aceeaşi în toate S.C.-urile inerţiale ; or, este imposibil să împăcăm acest fapt cu transformarea clasică : cercul trebuie rupt undeva. Oare nu tocmai aici ? Nu am putea oare concepe astfel de schimbări ale ritmului unui ceasornic în mişcare

și ale lungimii unui baston în mișcare încît din ele să decurgă, în mod direct, constanța vitezei luminii ? Ei bine, putem ! Aceasta este prima dată cînd teoria relativității și fizica clasică se deosebesc radical. Raționamentul nostru poate fi inversat : dacă viteza luminii este aceeași în toate S.C.-urile, atunci barele în mișcare trebuie să-și schimbe lungimea, ceasornicele în mișcare trebuie să-și modifice ritmul și anume după legi perfect determinate.

Nu este nimic misterios, ori absurd, în cele de mai sus. În fizica clasică s-a admis întodeauna că ceasornicele au același ritm, indiferent dacă sînt în mișcare sau în repaus, că barele au aceeași lungime atît în mișcare cît și în repaus. Dar, dacă viteza luminii este aceeași în toate S.C.-urile, dacă teoria relativității este valabilă, atunci trebuie să sacrificăm această ipoteză. Este greu să ne eliberăm de prejudecăți adînc înrădăcinate, dar nu avem încotro. Din punctul de vedere al teoriei relativității, vechile concepții apar arbitrare. De ce să credem, cum am făcut nu mai departe decît cu cîteva pagini în urmă, în timpul absolut, care se scurge în același fel pentru toți observatorii din toate S.C.? De ce să credem că distanțele sînt invariabile ? Durata este determinată cu ceasornice, coordonatele spațiale cu bare ; prin urmare, rezultatul determinării acestor mărimi ar putea depinde de felul cum se comportă barele și ceasornicele, cînd se află în mișcare. Nu avem nici o justificare pentru a crede că ele se vor comporta așa cum ne convine nouă. Observațiile arată indirect, prin intermediul fenomenelor cîmpului electromagnetic, că un ceasornic în mișcare își schimbă efectiv ritmul și o bară în mișcare, lungimea, ceea ce n-am fi crezut cu putință bazîndu-ne numai pe fenomenele mecanice. Trebuie să acceptăm ideea de durată relativă, diferită în fiecare S.C., fiindcă aceasta este cea mai bună ieșire din dificultățile noastre. Progresul ulterior al științei realizat pe baza teoriei relativității arată, în același timp, că acest nou mod de a privi lucrurile nu trebuie considerat numai ca un *malum necesarium,* deoarece avantajele teoriei sînt indiscutabile.

Pînă aici am încercat să înfățișăm faptele care au dus la ipotezele fundamentale ale teoriei relativității și felul

în care teoria ne-a constrîns să revizuim şi să modificăm transformarea clasică, tratînd timpul şi spaţiul într-un nou mod. Obiectivul nostru general este să indicăm ideile care stau la baza fiecărei concepţii fizice şi filosofice. În cazul de faţă, aceste idei sînt simple, dar, aşa cum au fost formulate aici, ele nu sînt suficiente pentru a ne conduce la concluzii cantitative şi nu numai calitative. Vom recurge deci din nou la vechea noastră metodă, care consistă în a lămuri numai ideile principale şi a enunţa apoi altele (cîteva) fără demonstraţie.

Pentru a arăta limpede diferenţa dintre concepţia vechiului fizician *V* care este un susţinător al transformării clasice şi a fizicianului modern *M* care este un adept al teoriei relativităţii, vom imagina un dialog între ei.

V. Eu sînt convins de valabilitatea principiului relativităţii al lui Galileu în mecanică, deoarce ştiu că legile mecanice sînt aceleaşi în două S.C.-uri care se mişcă uniform unul faţă de altul, cu alte cuvinte sînt convins că aceste legi sînt invariante faţă de transformarea clasică.

M. Bine, dar principiul relativităţii trebuie să se aplice tuturor evenimentelor din lumea exterioară. Nu numai legile mecanicii, ci toate legile naturii trebuie să fie aceleaşi în sistemele de coordonate care se mişcă uniform unul faţă de altul.

V. Dar, cum pot fi identice toate legile naturii în S.C.-urile care se mişcă unul faţă de altul ? Ecuaţiile cîmpului, adică ecuaţiile lui Maxwell nu sînt invariante faţă de transformarea clasică. Faptul acesta apare limpede în cazul vitezei luminii. Potrivit transformării clasice, această viteză ar trebui să fie diferită în două S.C.-uri care se mişcă unul faţă de altul.

M. Aceasta arată doar că transformarea clasică nu este aplicabilă, că relaţia dintre două S.C. trebuie să fie alta ; că vitezele şi coordonatele nu se transformă potrivit acestor legi. Ele trebuie înlocuite cu noi legi de transformare deduse din ipotezele fundamentale ale teoriei relativităţii. Să nu ne preocupăm de expresia matematică a acestei legi, ci să ne mulţumim a şti că ea este diferită de cea a transformării clasice. O vom numi pe scurt *transformarea lui Lorentz*. Se poate arăta că ecuaţiile

lui Maxwell, adică legile cîmpului, sînt invariante față de transformarea Lorentz întocmai ca legile mecanicii față de transformarea clasică. Să ne amintim care era situația în fizica clasică. Aveam legi de transformare pentru coordonate și legi de transformare pentru viteze, dar legile mecanicii erau aceleași pentru două S.C.-uri în mișcare uniformă unul față de altul. Aveam legi de transformare pentru spațiu nu însă și pentru timp, el fiind același în toate S.C. În teoria relativității lucrurile stau însă altfel : legile de transformare pentru spațiu, timp și viteză sînt diferite de cele clasice. Legile naturii sînt tot identice în toate S.C.-urile care se mișcă uniform unul față de altul. Ele trebuie însă să fie invariante, nu față de transformarea clasică ca înainte, ci față de un nou tip de transformare, așa-numita transformare Lorentz. În toate S.C.-urile inerțiale sînt valabile aceleași legi și trecerea de la un S.C. la altul este dată de transformarea Lorentz.

V. Vă cred pe cuvînt, dar m-ar interesa să cunosc diferența dintre transformarea clasică și cea a lui Lorentz.

M. Vă voi lămuri în felul următor : numiți-mi pe rînd unele caracteristici ale transformării clasice, iar eu vă voi preciza pentru fiecare in parte dacă s-a conservat în transformarea Lorentz, iar în caz contrar, cum s-a modificat

V. Dacă în S.C.-ul meu se întîmplă ceva într-un punct dat, la un moment dat, atunci un observator situat în alt S.C. care se mișcă uniform față de al meu, atribuie alt număr poziției în care are loc acest eveniment, însă evident, același timp. În toate S.C.-urile noastre, noi folosim același ceasornic ; nu contează dacă ceasul se mișcă sau nu. Este valabil acest lucru și pentru Dvs ?

M. Nu, nu este. Fiecare S.C. trebuie să fie prevăzut cu propriul lui ceasornic, în repaus, întrucît mișcarea îi schimbă ritmul. Doi observatori situați în două S.C.-uri diferite vor atribui numere diferite nu numai poziției, ci și momentului in care se produce un eveniment.

V. Aceasta înseamnă că timpul nu mai este invariant. În transformarea clasică el este întotdeauna ace-

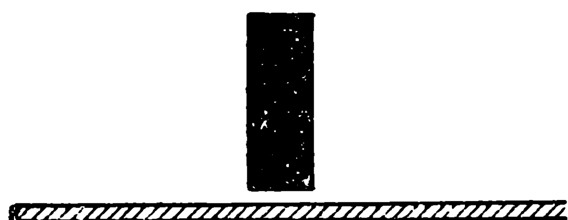
lași în toate S.C.-urile. În transformarea Lorentz el se schimbă, comportîndu-se oarecum ca o coordonată în vechea transformare. Dar cu distanța ce se întîmplă? Potrivit mecanicii clasice o bară rigidă își menține lungimea fie că este în mișcare, fie că este în repaus. Mai este valabil acest lucru acum?



M. Nu, nu mai este. Din transformarea lui Lorentz rezultă că un baston în mișcare se contractă în direcția mișcării, contracția crescînd cu viteza. Cu cît bara se mișcă mai repede, cu atît se scurtează mai tare. Dar aceasta se întîmplă numai în direcția mișcării. În fig. 58 puteți vedea o bară în mișcare reducîndu-se la jumătate, cînd viteza ei atinge cam 90% din viteza luminii. Perpendicular pe direcția mișcării, nu are loc însă nici o contracție cum am încercat să arăt în figura următoare (fig. 59).



Fig. 58



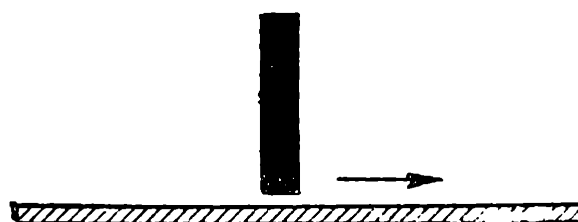


Fig. 59

V. Aceasta înseamnă că ritmul unui ceasornic în mișcare și lungimea unui baston în mișcare depind de viteză. Dar în ce fel?

M. Schimbările devin mai distincte dacă viteza crește. Din transformarea lui Lorentz rezultă că o bară s-ar anihila dacă ar ajunge să aibă o viteză egală cu a luminii. Asemănător, ritmul unui ceasornic în mișcare este mai lent decît al ceasornicelor prin dreptul cărora trece în lungul barei, iar dacă ceasornicul ar atinge viteza luminii, adică dacă ar fi un ceas „bun“, atunci el s-ar opri.

V. Aceasta pare a contrazice întreaga noastră experiență. Știm că un automobil nu se scurtează cînd se mișcă și știm că un șofer poate să-și compare ceasul lui „bun" cu cele pe care le întîlnește în drumul lui constatînd, contrar afirmației Dvs., că ele concordă destul de bine.

M. Este adevărat. Dar vitezele mecanice sînt foarte mici în comparație cu cea a luminii, de aceea este ridicol să le aplicăm acestor fenomene relativitatea. Orice șofer ar putea folosi liniștit fizica clasică chiar dacă ar fi să-și mărească viteza de 100 000 de ori. Nu ne putem aștepta să constatăm un dezacord între experiență și transformarea clasică decît în cazul vitezelor care se apropie de cea a luminii. Numai cu viteze foarte mari poate fi verificată valabilitatea transformării Lorentz.

V. Dar mai este o dificultate. Potrivit mecanicii îmi pot imagina corpuri care au viteze chiar mai mari decît a luminii. Un corp care, față de un vapor în mișcare, se mișcă cu viteza luminii, față de țărm se mișcă cu o viteză mai mare decît a luminii. Ce se va întîmpla cu bara care se contracta pînă la anihilare cînd viteza ei devenea egală cu cea a luminii ? Nu vedem cum ne-am putea reprezenta o lungime negativă pentru viteze mai mari decît a luminii.

M. Sarcasmul Dvs. este neîntemeiat. Potrivit teoriei relativității, un corp material nu poate avea o viteză mai mare decît cea a luminii. Viteza luminii constituie o limită superioară pentru vitezele tuturor corpurilor materiale. Dacă viteza unui corp este egală cu cea a luminii față de vapor, ea va fi egală tot cu viteza luminii și față de țărm. Legea simplă de adunare și scădere a vitezelor nu mai este valabilă sau mai precis este valabilă numai aproximativ, pentru viteze mici nu și pentru cele care tind spre viteza luminii. Numărul care exprimă viteza luminii intervine în mod explicit în transformarea Lorentz și joacă rolul de viteză limită, asemănător vitezei infinite în mecanica clasică. Această teorie mai generală nu contrazice transformarea clasică și mecanica clasică. Dimpotrivă, vechile concepte rezultă ca un caz limită, cînd vitezele sînt mici. În noua teorie apare

limpede în care cazuri este valabilă fizica clasică, care sînt limitele ei. Ar fi tot atît de ridicol să aplicăm teoria relativităţii mişcării unui automobil, vapor sau tren, pe cît ar fi să ne slujim de o maşină de calculat unde ne este de ajuns o tablă a înmulţirii.

§ 28. RELATIVITATEA ŞI MECANICA

Teoria relativităţii s-a născut sub presiunea necesităţii, ca urmare a contrazicerilor grave şi adînci din sînul vechii teorii, care păreau fără ieşire. Superioritatea noii teorii rezidă în consecvenţa şi simplicitatea cu care înlătură toate aceste dificultăţi, bazîndu-se numai pe un număr restrîns de ipoteze plauzibile.

Deşi teoria s-a născut din problema cîmpului, ea trebuie să îmbrăţişeze toate legile fizicii. În legătură cu aceasta, pare să se ivească încă o dificultate. Legile cîmpului şi legile mecanicii se deosebesc radical între ele ca natură. Ecuaţiile cîmpului electromagnetic sînt invariante faţă de transformarea Lorentz, iar ecuaţiile mecanice faţă de transformarea clasică. Dar teoria relativităţii cere ca legile naturii să fie toate invariante faţă de transformarea Lorentz şi nu faţă de trasformarea clasică. Aceasta ar trebui să reprezinte numai un caz particular al transformării Lorentz, limita spre care tinde ea cînd vitezele relative a două S.C.-uri sînt foarte mici. Dacă este aşa, mecanica clasică ar urma să fie modificată în aşa fel încît să devină conformă cu postulatul invarianţei faţă de transformarea Lorentz. Sau, cu alte cuvinte, mecanica clasică încetînd să mai fie valabilă cînd vitezele se apropie de cea a luminii, nu există decît un singur mod de a trece de le un S.C. la altul, anume transformarea Lorentz.

A fost uşor să se modifice mecanica clasică în aşa fel încît să nu contrazică nici teoria relativităţii nici materialul abundent strîns prin observaţii şi explicat de mecanica clasică. Vechea mecanică a rămas valabilă pentru viteze mici, reprezentînd cazul limită al noii mecanici

Ar fi interesant să trecem în revistă cîteva schimbări introduse în mecanica clasică de teoria relativității. Am putea poate astfel trage concluzii susceptibile de a fi confirmate sau infirmate de experiență.

Să considerăm un corp cu o masă determinată care se mișcă în linie dreaptă și asupra căruia acționează o forță exterioară, în direcția mișcării lui. După cum știm, forța este proporțională cu variația vitezei. Adică, pentru a fi mai expliciți, potrivit mecanicii clasice, este tot una dacă un corp dat își mărește viteza într-o secundă de la 100 la 101 metri pe secundă sau de la 100 km/s la 100 km/s plus un metru pe secundă, sau de la 300.000 km/s la 300.000 km/s plus un metru pe secundă. In toate aceste trei cazuri forța necesară pentru a imprima corpului aceeași variație a vitezei, în același timp, este aceeași.

Confirmă teoria relativității această concluzie ? Nici decum ! Această lege este valabilă numai pentru viteze mici. Care este atunci, potrivit teoriei relativității, legea vitezelor mari care se apropie de aceea a luminii ? După teoria relativității, dacă viteza este mare, este nevoie de forțe extrem de mari pentru a o spori. Nu este același lucru să mărești cu un metru pe secundă o viteză de ordinul a 100 de metri pe secundă sau o viteză care se apropie de cea a luminii. Cu cît viteza este mai aproape de aceea a luminii, cu atît creșterea ei este mai greu de realizat. O viteză egală cu cea a luminii nu mai poate fi mărită. Această modificare impusă de teoria relativității nu trebuie să ne surprindă. Viteza luminii reprezintă o limită superioară pentru toate vitezele. Nici o forță finită, oricît ar fi ea de mare, nu poate face ca o viteză să întreacă această limită. Locul vechilor legi mecanice, care exprimau corelația dintre forță și variația de viteză, îl ia o lege mai complicată. Din noul nostru punct de vedere, mecanica clasică apare simplă, deoarece în mai toate observațiile avem de a face cu viteze mult mai mici decît cea a luminii.

Un corp în repaus are o masă determinată numită *masa de repaus*. Știm, din mecanică, că orice corp se opune tendinței de a i se schimba mișcarea, împotrivirea fiind cu atît mai puternică cu cît masa lui este mai mare și cu

atît mai slabă cu cît masa este mai mică. Dar, în teoria relativității intervine ceva mai mult. Corpul se opune mai puternic nu numai dacă masa lui de repaus este mai mare, ci și dacă viteza lui este mai mare. Corpurile cu viteze apropiate de cea a luminii opun o rezistență foarte puternică forțelor exterioare. În mecanica clasică rezistența opusă de un corp dat era o entitate invariabilă, caracterizată exclusiv prin masa corpului. În teoria relativității ea depinde atît de masa de repaus cît și de viteză. Cînd viteza tinde spre cea a luminii, rezistența devine infinit de mare.

Concluziile de mai sus ne dau posibilitatea de a supune teoria unei verificări experimentale. Proiectilele, a căror viteză se apropie de cea a luminii, se opun oare acțiunii unei forțe exterioare așa cum prevede teoria? Deoarece afirmațiile teoriei relativității, în problema aceasta, au un caracter cantitativ, vom putea confirma sau infirma teoria dacă putem realiza proiectile cu o viteză apropiată de cea a luminii.

În adevăr, în natură găsim proiectile de asemenea viteze. Atomii substanțelor radioactive, de exemplu ai radiului, se comportă ca niște baterii care lansează proiectile cu viteze uriașe. Pentru a lămuri aceasta, ne vom mărgini să enunțăm una dintre cele mai importante concepții ale fizicii și chimiei moderne, fără a intra în amănunte. Întreaga materie din Univers este constituită din puține specii de *particule elementare*, asemenea clădirilor dintr-un oraș, care, deși diferă ca mărime, construcție și arhitectonică, sînt construite toate, de la colibă la zgîrie-nori, din foarte puține feluri diferite de cărămizi, aceleași pentru toate clădirile. La fel, toate elementele cunoscute ale lumii noastre materiale, de la hidrogen care este cel mai ușor pînă la uraniu care este cel mai greu [1]), sînt construite din aceleași feluri de cărămizi, adică din aceleași tipuri de particule elementare. Elementele cele mai grele, construcțiile cele mai complicate, sînt nestabile

[1]) Recent, un grup de savanți americani a anunțat descoperirea elementului 102, al zecelea element sintetic. El se va numi *nobelium*, după numele Institutului Nobel din Stokholm. N. Red. E. T.

și se dezintegrează sau, cum se spune, *sînt radioactive*. Unele din cărămizi, adică din particulele elementare din care sînt construiți atomii radioactivi, sînt expulzate uneori cu o viteză foarte mare care se apropie de cea a luminii. Potrivit concepțiilor noastre actuale, confirmate de multe experiențe, atomul unui element, să zicem al radiului, este un edificiu complex și dezintegrarea radioactivă este unul din fenomenele cari arată că atomii sînt alcătuiți din cărămizi mai simple, din particulele elementare.

Cu ajutorul unor experiențe foarte ingenioase și complicate, putem stabili cum se opun aceste particule acțiunii forțelor exterioare. Experințele arată că rezistența opusă de aceste particule depinde de viteză, în modul prezis de teoria relativității. În numeroasele cazuri, în care s-a putut pune în evidență o dependență de viteză a rezistenței opuse, s-a constatat o concordanță deplină între teorie și experiență. În acest exemplu regăsim esența activității creatoare în știință : prezicerea anumitor fapte de către teorie și confirmarea lor de către experiență.

Acest rezultat sugerează o altă generalizare importantă. Un corp în repaus are masă, dar nu are energie cinetică, adică energie de mișcare. Un corp în mișcare are atît masă cît și energie cinetică. Dar el se opune variației de viteză mai puternic decît corpul în repaus. Prin urmare, totul se petrece ca și cum energia cinetică a corpului în mișcare i-ar mări împotrivirea. Dintre două corpuri cu aceeași masă de repaus, cel cu o energie cinetică mai mare se opune mai puternic acțiunii unei forțe exterioare.

Să ne imaginăm o cutie care conține mingi, atît cutia cît și mingile fiind în repaus în S.C.-u lnostru. Pentru a o pune în mișcare, pentru a-i mări viteza, este necesară o forță. Dar, va mări această forță viteza cu aceeași cantitate, în același timp, și atunci cînd mingile s-ar agita în interiorul cutiei, asemenea moleculelor unui gaz, cu o viteză vecină de cea a luminii ? Nu, în cazul acesta ar fi necesară o forță mai mare, din cauză că energia cinetică, mărită, a mingilor mărește opunerea cutiei. Prin urmare, energia, cel puțin cea cinetică, se opune mișcării în ace-

lași fel ca masa ponderabilă. Se verifică aceasta pentru toate felurile de energie ?

Teoria relativității deduce din ipotezele ei fundamentale un răspuns clar și plauzibil la această întrebare, și anume tot un răspuns cu caracter cantitativ ; orice energie se opune variației mișcării ; orice energie se comportă ca materia ; o bucată de fier cîntărește mai mult cînd este încălzită la roșu decît cînd este rece ; o radiație solară care rătăcește prin spațiu conține energie și prin urmare are masă. Soarele și toate stelele care radiază pierd din masa lor prin însuși faptul că emit radiații. Această concluzie, cu caracter absolut general, este o cucerire importantă a teoriei relativității și ea concordă cu toate faptele cu care a fost confruntată.

Fizica clasică a introdus două substanțe : materia și energia. Prima avea greutate, cea de a doua era lipsită de greutate. În fizica clasică aveam două legi de conservare : una pentru materie, alta pentru energie. Ne-am întrebat mai înainte dacă fizica modernă menține concepția celor două substanțe și cele două legi de conservare. Răspunsul este : „Nu". Potrivit teoriei relativității, între masă și energie nu este o deosebire esențială ; energia are masă și masa reprezintă energie. În loc de două legi de conservare avem una singură, a masei-energiei. În dezvoltarea ulterioară a fizicii, această nouă concepție s-a verificat cu succes și s-a dovedit foarte fecundă.

Cum se explică, deci, că faptul că energia are masă și masa reprezintă energie, a rămas atîta timp în întuneric? Este oare greutatea unei bucăți de fier calde mai mare decît a unei bucăți reci ? Acum răspunsul la această întrebare este : *„Da"*. Dar la pag. 37 el fusese : *„Nu"*. Or, cele 120 pagini dintre cele două răspunsuri încă nu sînt de ajuns pentru a acoperi această contrazicere.

Dificultatea pe care o întîmpinăm aici este de aceeași natură cu altele întîlnite. Variația masei, prezisă de teoria relativității, este nemăsurabil de mică, și, ca atare, nu poate fi pusă în evidență prin cîntărire directă, chiar cu balanțele cele mai sensibile. Dovada faptului că energia nu este lipsită de greutate poate fi totuși făcută pe mai multe căi concludente, dar toate indirecte.

Inexistența dovezilor imediate se datorește micimii raportului de transformare dintre materie și energie. Comparată cu masa, energia este ca o monedă depreciată față de o valută forte. Un singur exemplu e de ajuns pentru a ilustra aceasta. Cantitatea de căldură capabilă să transforme în abur 30000 de tone de apă ar cîntări cam un gram ! Energia a fost considerată mult timp ca fiind lipsită de greutate, din cauză că masa pe care o reprezintă este extrem de mică.

Vechea energie-substanță este cea de a doua victimă a teoriei relativității. Prima fusese mediul introdus pentru propagarea undelor de lumină.

Influența teoriei relativității se extinde nu numai asupra problemei din care ea s-a născut. Ea înlătură dificultățile și contrazicerile teoriei cîmpului. Ea formulează legi mecanice mai generale. Ea înlocuiește două legi de conservare printr-una singură. Ea schimbă noțiunea noastră clasică de timp absolut. Valabilitatea ei nu se limitează la un singur domeniu al fizicii. Ea constituie un cadru general care cuprinde toate fenomenele naturii.

§ 29. COTINUUMUL SPAȚIU — TIMP

„Revoluția Franceză a izbucnit la Paris la 14 iulie 1789". În această frază se precizează locul și timpul unui eveniment. Celui ce aude pentru prima dată această afirmație, fără a ști ce înseamnă „Paris", i s-ar putea da următoare lămurire : Parisul este un oraș situat pe Pămîntul nostru, la 2° longitudine estică și 49° latitudine nordică. Cele două numere ar caracteriza locul și „14 iulie 1789" momentul cînd a avut loc evenimentul. În fizică, mult mai mult decît în istorie, specificarea exactă a locului și a momentului cînd s-a produs un eveniment este de mare importanță deoarece aceste date constituie baza unei descrieri cantitative.

Pentru simplicitate, pînă acum, am considerat numai mișcări rectilinii. Sistemul nostru de coordonate era o bară rigidă cu un reper inițial, dar fără reper terminal. Să menținem această restricție. Să considerăm diferite puncte pe bară ; poziția fiecăruia poate fi caracterizată printr-un

număr, prin coordonata punctului. Cînd spunem că coordonata unui punct este, de exemplu, de 7,586 cm, înțelegem că distanța lui măsurată de la originea barei este de 7,586 cm. Reciproc, dacă ni se dă un număr oarecare și o unitate, putem oricînd să găsim un punct, situat pe bară, care să corespundă acestui număr. Putem spune : fiecărui număr îi corespunde un punct anumit pe bară și fiecărui punct îi corespunde un număr determinat. Faptul acesta matematicienii îl formulează astfel : toate punctele unei bare formează un *continuum unidimensional.* Fiind dat un punct oarecare pe bară, putem găsi un punct oricît de aproape vrem de el. Putem deci uni două puncte distincte de pe bară prin „pași" oricît de mici dorim. Micimea aceasta arbitrară a „pașilor" prin care se pot uni puncte distanțate este caracteristica continuumului.

Să luăm un alt exemplu. Avem un plan sau dacă preferați ceva mai concret, suprafața unei mese dreptunghiulare. Pentru a defini poziția unui punct pe această masă trebuie indicate două numere, nu unul singur ca pînă acum. Cele două numere pot fi, de exemplu, distanțele punctului față de două muchii perpendiculare ale mesei. Fiecărui punct din plan îi corespunde o pereche de numere, nu unul singur ; reciproc, fiecărei perechi de numere îi corespunde un punct definit în plan. Cu alte cuvinte planul este un *continuum bidimensional* (fig. 60). Fiind dat un punct oarecare în plan, putem găsi puncte oricît de aproape vrem de el. Prin urmare, două puncte separate printr-o distanță pot fi unite printr-o curbă pe care o putem fracționa în segmente oricît de mici vrem. Prin urmare, caracteristica continuumului bidimensional este tot micimea arbitrară a „pașilor" în care poate fi împărțită distanța a două puncte, de data aceasta reprezentate fiecare prin două numere.

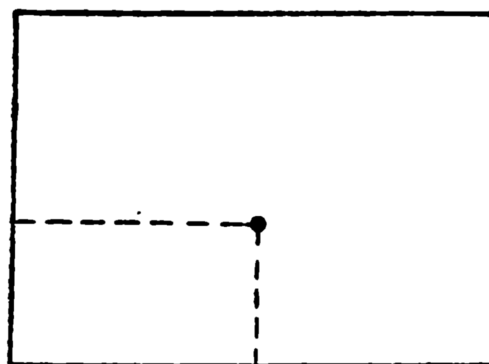


Fig. 60

Încă un exemplu. Să admitem că ați adoptat drept S.C. camera Dvs. Aceasta înseamnă că vă propuneți să

determinați toate pozițiile în raport cu pereții rigizi ai camerei. Poziția lămpii, dacă ea este în repaus, poate fi definită prin trei numere, două din ele reprezentînd distanța ei față de doi pereți perpendiculari, cel de-al treilea distanța ei față de podea sau de plafon. Fiecărui punct al spațiului îi corespund trei numere definite, și reciproc, fiecărui grup de trei numere îi corespunde un punct definit din spațiu. Aceasta se poate exprima prin fraza : spațiul nostru este un *continuum tridimensional* (fig. 61).

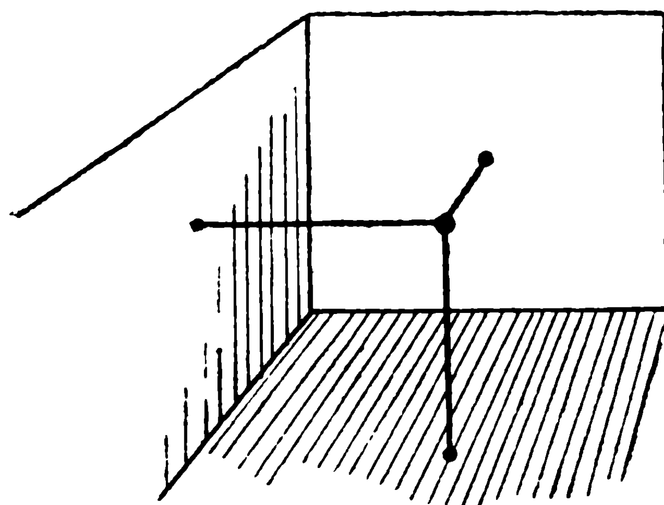


Fig. 61

Fiind dat un punct oarecare al spațiului, se pot găsi puncte oricît de apropiate vrem de el. Și caracteristica continuumului tridimensional este tot micimea arbitrară a „pașilor" cu care pot fi unite puncte distanțate, reprezentate fiecare prin trei numere.

Dar, toate acestea încă nu înseamnă fizică. Pentru a reveni la fizică trebuie să tratăm mișcări ale particulelor materiale. Pentru a observa și prezice evenimente din natură, trebuie să luăm în considerare nu numai locul ci și timpul evenimentelor fizice. Să ne referim din nou la un exemplu foarte simplu.

Să lăsăm să cadă dintr-un turn o piatră mică, care poate fi considerată ca o particulă. Să zicem că turnul are o înălțime de 80 de metri. Încă de pe vremea lui Galileu, se putea prezice coordonata pietrei într-un moment oarecare de la începerea căderii ei. Dăm mai jos un „orar" care indică pozițiile pietrei după 0, 1, 2, 3 și 4 secunde.

Timpul, în secunde	0	1	2	3	4
Înălțimea, în metri	80	75	60	35	0

El conține cinci evenimente, fiecare dintre ele fiind reprezentat printr-o pereche de numere, timpul și coordonata spațială corespunzătoare. Primul eveniment este lansarea pietrei de la înălțimea de 80 de metri, la secunda zero. Al doilea eveniment este coinciderea pietrei cu bara noastră rigidă (turnul) la 75 metri deasupra solului. El are loc după scurgerea primei secunde. Ultimul eveniment este coinciderea pietrei cu solul.

Informațiile deduse din „orarul" nostru le putem reprezenta și în alt fel, figurînd cele cinci perechi de numere din „orar" ca cinci puncte pe un plan. Să adoptăm întîi o scară de măsură : cele două segmente din figură reprezintă, unul distanța de 20 metri, celălalt intervalul de o secundă (fig. 62).



Fig. 62

Trasăm apoi două linii perpendiculare numind, de exemplu, pe cea orizontală axa timpului și pe cea verticală axa spațiului. Constatăm numaidecît că „orarul" nostru poate fi reprezentat prin cinci puncte în planul nostru spațiu-timp.

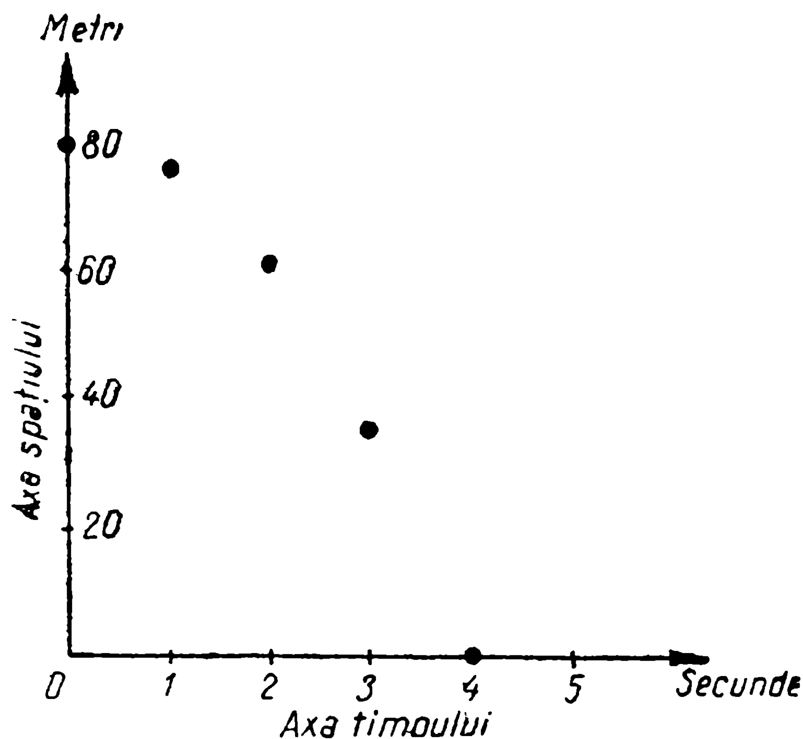


Fig. 63.

Distanțele punctelor față de axa spațială reprezintă coordonatele lor temporale care figurează în prima linie

a „orarului" nostru, iar distanțele punctelor față de axa timpului reprezintă coordonatele lor spațiale (fig. 63).

Unul și același lucru este exprimat sub două forme diferite : prin „orar" și prin puncte în plan. Fiecare din cele două reprezentări poate fi dedusă din cealaltă. Alegerea uneia din aceste două reprezentări este o chestiune numai de gust, căci în fond ele sînt echivalente.

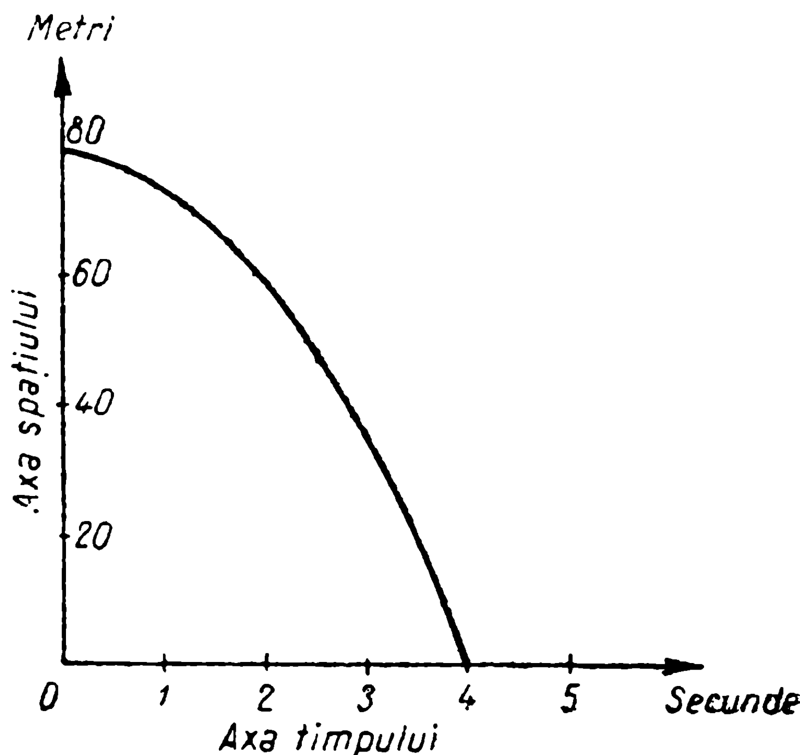


Fig. 64

Să facem un pas mai departe. Să ne imaginăm un „orar" mai amănunțit care ne-ar da poziția, nu din secundă în secundă, ci să zicem din sutime în sutime sau din miime în miime de secundă. Am avea atunci foarte multe puncte în planul nostru spațiu-timp. Continuînd așa, s-ar ajunge ca poziția să fie indicată pentru fiecare moment, sau cum spun matematicienii, coordonata spațială ar fi exprimată ca funcție de timp ; atunci, șirul nostru de puncte s-ar transforma într-o linie continuă. Figura următoare nu dă o cunoaștere fragmentată ca mai înainte, ci cunoașterea completă a mișcării (fig. 64).

În această reprezentare, mișcarea în lungul barei rigide (turnului), mișcarea în spațiul unidimensional, este redată printr-o curbă într-un continuum bidimensional

spațiu-timp. Fiecărui punct din continuumul nostru spațiu-timp îi corespunde o pereche de numere dintre care, unul reprezintă timpul, celălalt coordonata spațială. Invers, fiecărei perechi de numere care caracterizează un eveniment îi corespunde un punct bine definit în planul nostru spațiu-timp. Două puncte vecine reprezintă două evenimente care s-au produs în două locuri puțin depărtate unul de altul și la două momente puțin diferite.

Împotriva reprezentării noastre s-ar putea obiecta că nu prea are sens să reprezentăm o unitate de timp printr-un segment, să o combinăm în mod mecanic cu spațiul, realizînd un continuum bidimensional din cele două continuumuri unidimensionale. Dar, atunci ar trebui să protestați, tot atît de energic, împotriva tuturor graficelor care reprezintă, de exemplu, variația temperaturii la New-York în cursul verii trecute, sau împotriva graficelor care reprezintă variația costului vieții în ultimii ani, căci în toate aceste cazuri este folosită exact aceeași metodă. De exemplu, în graficul temperaturii, continuumul unidimensional al temperaturii este combinat cu continuumul unidimensional al timpului, dînd continuumul bidimensional temperatură-timp.

Să ne întoarcem la particula noastră lăsată să cadă din vîrful turnului cu înălțimea de 80 metri. Modul nostru de a reprezenta grafic mișcarea constituie o convenție utilă, deoarece el precizează poziția particulei în fiecare moment. Acum, fiindcă știm cum se mișcă particula, să reprezentăm din nou mișcarea ei. Putem face aceasta în două moduri distincte.

Ne amintim reprezentarea în care particula își schimbă poziția în timp, în spațiul unidimensional. În această reprezentare mișcarea apare ca o succesiune de evenimente în continuumul spațial unidimensional. În această imagine *dinamică*, în care pozițiile *se schimbă* în timp, timpul și spațiul nu se contopesc.

Putem însă reprezenta aceeași mișcare folosind și alt procedeu. Considerînd curba care corespunde mișcării în continuumul bidimensional spațiu-timp, obținem o imagine *statică* a mișcării. Acum, mișcarea este reprezentată ca ceva care *este*, care *există* în continuumul bidimensional

spațiu-timp și nu ca ceva care evoluează în continuumul unidimensional spațial.

Ambele reprezentări sînt absolut echivalente și a prefera una sau alta este numai o chestiune de convenție și de gust.

Nimic din ceea ce s-a spus aici cu privire la cele două reprezentări nu are de a face cu teoria relativității. Ambele reprezentări pot fi folosite cu aceeași îndreptățire; dar fizica clasică favorizează reprezentarea dinamică concepînd mișcarea ca o succesiune de evenimente în spațiu și nu ca ceva existent în spațiu-timp. Teoria relativității a schimbat acest punct de vedere. Ea este net în favoarea reprezentării statice, considerînd că această reprezentare a mișcării, ca ceva existent în spațiu-timp, furnizează o imagine mai adecuată și mai obiectivă a realității. Trebuie să mai răspundem la o întrebare. De ce aceste două imagini, echivalente din punct de vedere al fizicii clasice, nu sînt echivalente din punctul de vedere al teoriei relativității ?

Răspunsul va apare limpede dacă vom considera din nou două S.C.-uri care se mișcă uniform unul față de altul.

Potrivit fizicii clasice, doi observatori situați în două S.C.-uri în mișcare uniformă unul față de altul vor atribui unui eveniment dat coordonate spațiale diferite dar aceeași coordonată temporală. Astfel, în exemplul nostru, atingerea solului de către particulă este caracterizată în S.C.-ul ales de noi prin coordonata temporală „4" și prin coordonata spațială „0". Potrivit mecanicii clasice, pentru un observator care se mișcă uniform față de S.C.-ul nostru, piatra va atinge Pămîntul tot după patru secunde. Dar un astfel de observator, raportînd distanța la S.C.-ul lui, va atribui evenimentului ciocnire, în principiu, altă coordonată spațială, iar coordonata temporală va fi aceeași pentru el și pentru toți ceilalți observatori care s-ar mișca uniform unul față de altul. Fizica clasică nu cunoaște decît scurgerea de timp „absolut" pentru toți observatorii. Pentru fiecare S.C., continuumul bidimensional poate fi despicat în două continuumuri unidimensionale : timp și spațiu. Din cauza caracterului „absolut"

al timpului în fizica clasică, tranziția de la reprezentarea „statică" la cea „dinamică" a mişcării are o semnificaţie obiectivă.

Dar am căzut de acord că transformarea clasică nu are aplicabilitate generală în fizică. Din punctul de vedere practic, ea se verifică pentru viteze mici, dar nu poate fi folosită pentru tratarea problemelor fundamentale ale fizicii.

Or, potrivit teoriei relativității, momentul ciocnirii pietrei cu Pămîntul nu va fi același pentru toți observatorii. Coordonata temporală și coordonata spaţială vor fi diferite în două S.C.-uri diferite și variația coordonatei temporale va fi foarte pronunţată dacă viteza relativă a celor două S.C.-uri este foarte apropiată de cea a luminii. Continuumul bidimensional nu poate fi deci despicat în două continuumuri unidimensionale, ca în fizica clasică. Nu ne este îngăduit să tratăm separat spaţiul şi separat timpul, cînd determinăm coordonatele spaţiale şi temporale în alt S.C. Din punctul de vedere al teoriei relativității, despicarea continuumului bidimensional în două continuumuri unidimesionale apare ca un procedeu arbitrar, fără o semnificaţie obiectivă.

Tot ce am spus pentru cazul mişcării rectilinii poate fi uşor extins asupra mişcării pe o curbă oarecare. În adevăr, pentru a descrie evenimentele din natură este nevoie de patru numere şi nu numai de două. Spaţiul nostru fizic, conceput cu ajutorul obiectelor şi al mişcării lor, are trei dimensiuni şi poziţiile sînt caracterizate prin trei numere. Momentul unui eveniment este cel de-al patrulea număr. Fiecărui eveniment îi corespund deci patru numere distincte și fiecărui grup de patru numere îi corespunde un eveniment determinat. Prin urmare: lumea evenimentelor formează un *continuum cuadridimensional*. Nu este nimic misterios în cele de mai sus și ultima propoziţie este valabilă deopotrivă pentru fizica clasică şi pentru teoria relativităţii. Însă, de îndată ce se consideră două S.C.-uri în mişcare relativă unul faţă de altul, apare din nou diferenţa celor două concepţii. Să ne referim din nou la camera în mişcare ; cei doi observatori, cel din in-

terior şi cel din exterior, determină coordonatele spaţiale şi temporale ale aceluiaşi eveniment.

Fizicianul clasic despică din nou continuumul cuadridimensional în spaţiul tridimensional şi în continuumul unidimensional al timpului. Vechiul fizician se rezuma la transformarea spaţiului, deoarece timpul este absolut pentru el. El găseşte despicarea continuumului cuadridimensional al Universului în spaţiu şi timp firească şi comodă. Dar, potrivit teoriei relativității, prin trecerea de la un S.C. la altul se transformă şi timpul nu numai spaţiul ; transformarea lui Lorentz ţine seamă de proprietăţile de transformare ale continuumului cuadridimensional spaţiu-timp al Universului nostru cuadridimensional al evenimentelor.

Lumea evenimentelor poate fi descrisă dinamic prin imagini care variază în timp, proiectate în spaţiul tridimensional. Ea poate fi însă descrisă şi prin reprezentări statice făcute în continuumul cuadridimensional spaţiu-timp. Din punctul de vedere al fizicii clasice, cele două imagini, cea dinamică şi cea statică, sînt echivalente. Dar din punctul de vede al teoriei relativității, reprezentarea statică este mai adecuată şi mai obiectivă.

Şi în teoria relativităţii putem folosi reprezentarea dinamică, dacă o preferăm. Nu trebuie să pierdem din vedere însă că această despicare în timp şi spaţiu nu are o semnificaţie obiectivă, căci timpul nu mai este absolut. În paginile următoare, vom continua să folosim limbajul dinamic şi nu pe cel static, avînd însă prezente în minte limitele lui.

§ 30. RELATIVITATEA GENERALĂ

Mai rămîne de lămurit un punct. Una din chestiunile cele mai fundamentale nu a fost încă pusă : există un sistem inerţial ? Am învăţat despre invarianța legilor naturii faţă de transformarea lui Lorentz şi despre valabilitatea lor în toate sistemele inerţiale în mişcare uniformă unul faţă de altul. Avem legi, dar nu cunoaştem reperul la care trebuie să le raportăm.

Pentru a sezisa bine această dificultate să-i luăm fizicianului clasic un interview sub forma cîtorva întrebări simple :

„Ce este un sistem inerțial" ?

„Un S.C. în care legile mecanicii sînt valabile. Un corp asupra căruia nu acționează forțe exterioare se mişcă uniform într-un astfel de S.C. Această proprietate ne oferă posibilitatea de a deosebi un S.C. inerțial de unul neinerțial".

„Dar ce înseamnă să spunem că nu acționează forțe asupra unui corp ?"

„Înseamnă pur şi simplu că el se mişcă uniform într-un S.C. inerțial".

Am putea repeta întrebarea : „Ce este un S.C. inerțial ?" Dar cum există puține şanse de a obține alt răspuns decît cel de mai sus, să încercăm să dobîndim informații concrete schimbînd întrebarea.

„Un S.C. solidar cu Pămîntul este inerțial?"

„Nu, fiindcă pe Pămînt legile mecanicii nu sînt riguros valabile din cauza rotației lui. Pentru multe probleme poate fi considerat inerțial un S.C. legat solidar cu Soarele, dar cînd vorbim de rotația Soarelui se înțelege că nici un S.C. legat de el nu poate fi considerat riguros inerțial."

„Atunci ce este, în concret, S.C.-ul Dvs. inerțial și ce trebuie presupus cu privire la starea lui de mişcare?"

„El este numai o ficțiune utilă și nu am idee cum poate fi realizat. Dacă mi-ar sta în putință să mă îndepărtez de orice corp material suficient pentru a mă elibera de toate acțiunile exterioare, atunci S.C.-ul meu ar deveni inerțial."

„Dar ce înțelegeți prin aceea că un S.C. este eliberat de toate acțiunile exterioare ?"

„Înțeleg că el este inerțial."

Am ajuns din nou la întrebarea de la care am pornit !

Interviewul nostru pune în lumină o gravă dificultate a fizicii clasice. Avem legi, dar nu știm la ce reper să le raportăm ; ca atare, tot edificiul fizicii pare a fi clădit pe nisip.

La aceeași dificultate ajungem venind din cu totul altă direcție. Să ne imaginăm că tot Universul ar consta dintr-un

singur corp, care ar constitui S.C.-ul nostru. Să admitem că acest corp începe să se rotească. Potrivit mecanicii clasice, legile fizice pentru un corp care se rotește vor fi diferite de cele pentru un corp. care nu se rotește. Dacă principiul inerției este valabil în primul caz, el nu mai este valabil în cazul al doilea. Dar aceasta sună foarte suspect. Ne este oare îngăduit să considerăm mișcarea unui singur corp în întregul Univers? Prin mișcarea unui corp înțelegem întotdeauna schimbarea poziției sale față de un al doilea corp. De aceea, a vorbi despre mișcarea unui singur corp contravine bunului simț. Mecanica clasică și judecata sănătoasă se contrazic însă vehement aici. Rețeta lui Newton este : dacă principiul inerției este valabil, atunci S.C.-ul este fie în repaus, fie în mișcare uniformă ; dacă prncipul inerției nu este valabil, atunci corpul este în mișcare neuniformă. De unde, pronunțarea verdictului : cutare S.C. este în repaus, respectiv în mișcare, dacă toate legile fizice sînt sau nu sînt aplicabile în S. C.-ul dat.

Să considerăm acum, pentru precizare, două corpuri : Pămîntul și Soarele. Mișcarea pe care o observăm este tot *relativă ;* în principiu ea poate fi descrisă legînd S.C.-ul fie de Pămînt, fie de Soare. Din punctul acesta de vedere, marea realizare a lui Copernic consistă tocmai în transportarea S.C.-ului de pe Pămînt în Soare. Totuși, cum mișcarea este relativă și cum în principiu orice sistem de referință poate fi folosit la fel de bine, favorizarea unuia din cele două S.C.-uri pare a nu avea nici o îndreptățire.

Dar, și în această problemă, intervine fizica pentru a ne corecta punctul de vedere bazat pe bunul simț ; S.C.-ul legat de Soare se apropie în măsură mai mare de un sistem inerțial decît cel legat de Pămînt. Urmează că este preferabil să se raporteze legile fizicii la S.C.-ul lui Copernic decît la cel al lui Ptolemeu. Importanța uriașei descoperiri a lui Copernic nu poate fi prețuită decît din punctul de vedere fizic. Ea ilustrează marele avantaj al folosirii unui S.C. legat solidar cu Soarele pentru descrierea mișcării planetelor.

În fizica clasică nu există mișcare uniformă absolută : dacă două S.C.-uri se mișcă uniform unul față de altul,

atunci n-are nici un sens să declarăm : „acest S.C. este în repaus şi celălalt în mişcare". Dar, dacă două S.C.-uri se mişcă neuniform unul faţă de altul, atunci există un temei pentru a afirma : „acest corp se mişcă şi celălalt este în repaus (sau se mişcă uniform)". Mişcarea absolută are un înţeles foarte bine definit. Prin urmare, în problema aceasta, între bunul simţ şi fizica clasică se deschide o prăpastie. Dificultăţile menţionate, cea a sistemului inerţial şi cea a mişcării absolute sînt strîns legate una de alta : posibilitatea mişcării absolute decurge din ideea existenţei unui sistem inerţial, în care legile naturii sînt valabile.

S-ar părea că nu există nici o ieşire din aceste dificultăţi, dat fiind că nici o teorie fizică nu le poate evita. Rădăcina lor rezidă în valabilitatea legilor naturii pentru o clasă specială de S.C.-uri, cele inerţiale. Posibilitatea învingerii acestei dificultăţi depinde de răspunsul pe care-l vom da întrebării următoare : Putem formula legi fizice care să fie valabile pentru toate S.C.-urile, nu numai pentru cele care se mişcă uniform, ci şi pentru cele care se mişcă oricum unul faţă de altul? Dacă acest lucru ar fi cu putinţă, atunci dificultăţile noastre ar dispare. Am putea atunci să aplicăm legile naturii oricărui S.C. Disputa, atît de îndîrjită la începuturile ştiinţei, între concepţia lui Ptolemeu şi cea a lui Copernic, ar deveni fără obiect. Fiecare dintre cele două S.C.-uri ar putea fi folosit cu aceeaşi îndreptăţire. Cele două afirmaţii „Soarele este în repaus şi Pămîntul se mişcă" sau „Soarele se mişcă şi Pămîntul este în repaus" ar constitui pur şi simplu două convenţii diferite, corespunzînd la două S.C.-uri diferite.

Putem construi o fizică cu adevărat relativistă, valabilă în orice S.C. ? O fizică în care să nu existe loc pentru mişcarea absolută, ci numai pentru cea relativă ? Lucrul acesta este posibil cu adevărat !

O indicaţie, deşi foarte vagă, cu privire la sensul în care trebuie construită noua fizică, avem : o fizică cu adevărat relativistă trebuie să se aplice la orice S.C. şi, prin urmare, în particular şi celor inerţiale. În aceste S.C.-uri legile ne sînt cunoscute. La ele trebuie să se reducă, în cazul particular al sistemului inerţial, noile legi generale valabile pentru toate S.C.-urile.

Problema formulării legilor fizice pentru orice S.C. a fost rezolvată de așa-numita *teorie a relativității generale*. Teoria anterioară, care se aplică numai sistemelor inerţiale, se numeşte *teoria relativităţii restrînse (speciale)*. Cele două teorii, bineînţeles nu se pot contrazice, deoarece trebuie să includem vechile legi ale teoriei relativității restrînse în legile generale pentru un sistem neinerţial. Dar exact după cum S.C.-ul inerțial era mai înainte singurul pentru care se formulaseră legile fizice, acum el va constitui un caz particular, cazul limită, deoarece acum sînt permise orice S.C., oricum s-ar mişca ele unul faţă de altul.

Acesta este programul teoriei relativităţii generale. Dar, în schiţarea modului în care a fost el adus la îndeplinire, va trebui să fim mai vagi chiar decît pînă acum. Noi greutăţi ivite în dezvoltarea ştiinţei obligă teoria noastră să devină din ce în ce mai abstractă. Ne aşteaptă peripeţii imprevizibile. Ținta noastră finală rămîne aceeași: înţelegerea mai adîncă a realităţii. Lanţului logic care leagă teoria şi observaţia i se adaugă noi verigi. Pentru a curăţa de ipoteze nenecesare şi artificiale calea care duce de la teorie la experienţă, pentru a cuprinde un domeniu tot mai întins de fapte, trebuie să dăm lanţului o lungime din ce în ce mai mare. Cu cît ipotezele devin mai simple şi mai fundamentale, cu atît se complică în schimb aparatul matematic, care intervine în raţionamente ; calea care duce de la teorie la observaţie devine mai lungă, mai subtilă, mai întortochiată. Oricît ar părea de paradoxal, fizica modernă este mai simplă decît cea veche, și tocmai de aceea pare mai grea şi mai complicată. Însă, cu cît imaginea pe care ne-o facem despre lumea exterioară este mai simplă, cu cît îmbrățișează mai multe fapte, cu atît ea oglindește mai puternic în mintea noastră armonia Universului.

Noua noastră idee este simplă : să construim o fizică valabilă pentru orice S.C. Traducerea ei în fapt creează însă complicaţii formale şi ne constrînge să folosim un aparat matematic diferit de cel folosit pînă acum în fizică. In cele ce urmează, vom arăta numai legătura dintre înfăptuirea acestui program și două probleme principale : gravitația și geometria.

§ 31. ÎN EXTERIORUL ŞI ÎN INTERIORUL UNUI ASCENSOR

Legea inerţiei marchează primul mare progres în fizică ; de fapt, ea înseamnă începutul fizicii. Ea a fost obţinută din reflexiunea asupra unei experienţe idealizate a mişcării perpetue a unui corp fără frecare şi fără forţe exterioare. Acest exemplu şi multe altele care i-au urmat ne-au permis să sezisăm importanţa experienţelor idealizate, concepute din reflexiune. Vom discuta acum tot nişte experienţe idealizate. Deşi ne vor părea cu totul fantastice, ele ne vor ajuta, totuşi, să înţelegem din relativitate atît cît ne îngăduie metodele noastre simple.

Am făcut apel, în repetate rînduri, la experienţe idealizate în care intervenea o cameră în mişcare uniformă. De astă dată vom examina cazul unui ascensor în cădere liberă.

Să ne imaginăm un ascensor mare în vîrful unui zgîrie-nori care să întreacă în înălţime pe toţi ceilalţi. Să presupunem că se rupe brusc cablul de susţinere şi ascensorul cade liber spre Pămînt, iar în tot cursul căderii nişte observatori efectuează experienţe în interiorul ascensorului. Pentru descrierea lor nu este necesar să luăm în considerare rezistenţa aerului sau frecarea, căci în condiţiile noastre idealizate putem să nu ţnem seamă de existenţa lor. Unul din observatori scoate o batistă şi ceasornicul din buzunar şi le lasă să cadă. Ce se va întîmpla cu cele două corpuri ? Pentru observatorul de afară care priveşte prin geamul ascensorului, atît batista cît şi ceasul cad spre Pămînt, absolut la fel, cu aceeaşi acceleraţie. Ne amintim că acceleraţia corpurilor care cad este cu totul independentă de masa lor şi că aceasta a fost faptul care a dezvăluit egalitatea dintre masa gravifică şi cea inertă (pag. 33). Ne amintim de asemenea, că, din punctul de vedere al mecanicii clasice, egalitatea celor două mase apăruse ca un fapt cu totul accidental şi care nu juca nici un rol în structura ei. Dimpotrivă, în cele ce urmează, această egalitate, oglindită în egalitatea acceleraţiilor tuturor corpurilor în cădere, este esenţială şi constituie baza întregii noastre argumentaţii.

Să revenim la batista şi la ceasornicul nostru în cădere;

pentru observatorul din exterior, ele cad amîndouă cu aceeași accelerație. Tot cu aceeași accelerație cad însă și pereții, podeaua și tavanul ascensorului. De aceea, distanța dintre cele două corpuri și podea nu va varia. Pentru observatorul din interior, cele două corpuri nu se clintesc din locul unde le lasă el libere. Se prea poate ca observatorul din interior să nu bănuiască nimic de existența cîmpului gravitațional, deoarece izvorul lui este exterior S.C.-ului său. El constată că în interiorul ascensorului nu se exercită nici o forță asupra celor două corpuri, astfel că ele sînt în repaus întocmai ca și cînd s-ar găsi într-un S.C. inerțial. Lucruri stranii se petrec în ascensorul nostru. Dacă observatorul împinge un corp într-o direcție oarecare, în sus sau în jos, de exemplu, el se mișcă uniform necontenit, afară doar dacă nu se lovește de podeaua sau de tavanul ascensorului. Pe scurt, pentru observatorul din interiorul ascensorului, legile mecanicii clasice sînt în vigoare. Toate corpurile se comportă în modul prevăzut de legea inerției. Într-o singură privință se deosebește de S.C.-ul inerțial noul nostru S.C., solidar cu ascensorul în cădere liberă. Într-un S.C. inerțial un corp o dată pus în mișcare, continuă să se miște uniform la infinit dacă nu acționează forțe asupra lui; S.C.-ul inerțial, așa cum este el definit în fizica clasică, nu este limitat nici în spațiu nici în timp. Alta este situația pentru observatorul din ascensorul nostru. Caracterul inerțial al S.C.-ului său este limitat în spațiu și în timp. Mai devreme sau mai tîrziu unul din corpurile în mișcare se va lovi de pereții ascensorului și mișcarea uniformă va fi distrusă. Mai de vreme sau mai tîrziu se va izbi de Pămînt întregul ascensor suprimînd observatorii cu experiențele lor cu tot ; S.C.-ul acesta este numai o „ediție de buzunar" a unui adevărat S.C. inerțial.

Caracterul local inerțial al S.C.-ului este absolut esențial. Dacă ascensorul nostru ipotetic s-ar întinde de la Polul Nord pînă la Ecuator, batista fiind lăsată să cadă în dreptul Polului Nord și ceasornicul în dreptul Ecuatorului, atunci pentru observatorul din exterior, cele două corpuri nu ar mai avea aceeași accelerație. De asemenea, ele nu ar mai fi în repaus unul față de altul ; toată argumentația noastră ar cădea. Dimensiunile ascensorului trebuie să fie

limitate îndeajuns pentru ca accelerațiile tuturor corpurilor din interiorul lui să poată fi considerate constante de observatorul exterior.

Cu această restricție S.C-ul capătă un caracter inerțial pentru observatorul din interior. Sîntem în situația de a putea indica un S.C. în care sînt valabile toate legile fizicii, chiar dacă el este limitat în timp și spațiu. Dacă imaginăm un alt S.C., în mișcare uniformă față de cel în cădere liberă, de exemplu un alt ascensor, atunci aceste două S.C.-uri vor fi local inerțiale. Toate legile vor fi exact aceleași în amîndouă. Trecerea de la unul la altul s-ar face în conformitate cu transformarea lui Lorentz.

Să vedem acum în ce mod descriu cei doi observatori, cel din exterior și cel din interior, ce se petrece în interiorul ascensorului.

Observatorul din exterior, studiind mișcarea ascensorului și a tuturor corpurilor din el, constată că aceste mișcări se fac în conformitate cu legea lui Newton a gravitației. Pentru el mișcarea nu este uniformă, ci accelerată, ca urmare a acțiunii cîmpului gravitațional al Pămîntului.

În schimb, o generație de fizicieni născuți și crescuți în ascensor ar judeca cu totul altfel. Ei s-ar crede în posesia unui sistem inerțial și ar raporta toate legile naturii la ascensorul lor, justificînd aceasta prin caracterul deosebit de simplu pe care îl au legile în S.C.-ul lor. Ei ar găsi absolut firesc să presupună că ascensorul lor este în repaus și că S.C.-ul lor este un S.C. inerțial. ,

Este imposibil să tranșăm divergența dintre cei doi observatori. Fiecare din ei ar putea revendica dreptul de a raporta toate evenimentele la sistemul său de coordonate, căci evenimentele pot fi descrise tot atît de corect în amîndouă.

Acest exemplu arată că descrierea consecventă a fenomenelor fizice în două S.C-uri diferite este posibilă, chiar atunci cînd ele nu se mișcă uniform unul față de altul. Dar, pentru descrierea aceasta trebuie să ne bazăm pe gravitație care constituie o „punte" de trecere de la un S.C. la altul. Cîmpul gravitațional există numai pentru observatorul din afară ; pentru observatorul din interior el nu există. Pentru observatorul din exterior ascensorul se

mişcă accelerat în cîmpul gravitațional, pentru observatorul din interior ascensorul este în repaus şi cîmpul gravitațional nu există. Dar cîmpul gravitațional, „puntea" care face posibilă descrierea în ambele S.C.-uri, se reazemă pe un stîlp de nezdruncinat : echivalența dintre masa inertă și cea gravifică. Fără acest fir conducător, neluat în seamă de mecanica clasică, considerațiile de față n-ar duce la nici un rezultat.

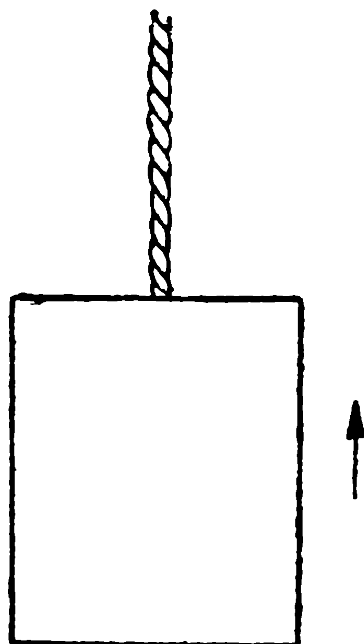


Fig. 65

Pentru a arăta aceasta, să analizăm o experiență idealizată, puțin diferită. Să admitem că ne găsim în prezența unui S. C. inerțial, în care legea inerției este deci valabilă. Am descris ce se petrece în ascensorul în repaus într-un astfel de S.C. inerțial. Să schimbăm acum desfăşurarea experienței : o persoană din afară a legat ascensorul cu o frînghie şi îl trage cu o forță constantă în direcția indicată în fig. 65 ; cum se realizează în mod concret această acțiune nu are nici o importanță. Întrucît legile mecanicii sînt valabile în S.C.-ul în discuție, întregul ascensor capătă o accelerație constantă în direcția înaintării lui. Să ascultăm din nou explicațiile pe care ni le dau cei doi observatori cu privire la fenomenele ce se petrec în ascensor.

Observatorul din exterior : Din S.C.-ul meu inerțial constat că ascensorul se mişcă cu accelerație constantă, deoarce asupra lui acționează o forță constantă. Observatorii din interior sînt în mişcare absolută ; pentru ei legile mecanicii nu sînt valabile. Pentru ei corpurile asupra cărora nu acționează forțe nu sînt în repaus. Un corp lăsat liber se loveşte în scurt timp de podeaua ascensorului fiindcă ascensorul se mişcă în sus, înspre corp ; aceasta se produce absolut la fel pentru un ceasornic şi pentru o batistă. Pentru mine este un spectacol bizar faptul că observatorul din ascensor este ca țintuit de „podea", căci de îndată ce face o săritură podeaua îl ajunge din urmă.

Observatorul din interior : Nu văd nici o rațiune pentru a considera că ascensorul meu este în mișcare absolută. Recunosc că S.C.-ul meu solidar cu ascensorul nu este cu adevărat inerțial, dar nu găsesc că aceasta ar avea ceva de a face cu mișcarea absolută. Ceasornicul meu, batista mea și toate corpurile cad din cauză că întregul ascensor se găsește într-un cîmp gravitațional. Eu înregistrez exact același tip de mișcare ca oamenii de pe Pămînt. Ei o explică foarte simplu prin acțiunea cîmpului gravitațional. Nu văd de ce n-aș interpreta la fel fenomenele.

Ambele descrieri, atît aceea a observatorului din exterior, cît și aceea a observatorului din interior sînt perfect consecvente și nu există nici un temei în virtutea căruia să considerăm pe una din ele ca fiind cea reală. Pentru redarea fenomenelor din ascensor este absolut indiferent dacă adoptăm punctul de vedere al observatorului din exterior : mișcare neuniformă și absența cîmpului gravitațional sau pe al observatorului din interior : repaus și prezența cîmpului gravitațional.

Observatorul din interior ar mai putea invoca posibilitatea ca ascensorul să fie în mișcare „absolută neuniformă". Dar o mișcare pe care simpla presupunere a acțiunii unui cîmp gravitațional o poate desființa nu poate revendica un caracter absolut.

Este posibilă o ieșire din ambiguitatea acestor două descrieri distincte și o decizie în favoarea uneia din ele. Să considerăm o rază de lumină care traversează ascensorul pătrunzînd în direcție orizontală printr-unul din pereții laterali și atingînd, după un timp foarte scurt, peretele opus. Să vedem cum va prezice drumul luminii fiecare din cei doi observatori.

Observatorul din exterior, convins că ascensorul are o mișcare accelerată, va raționa astfel : lumina pătrunde prin fereastră și se îndreaptă orizontal, în linie dreaptă și cu viteza constantă către peretele opus. Dar ascensorul se mișcă în sus, și în timp ce lumina străbate distanța dintre un perete și celălalt, ascensorul își schimbă poziția. De aceea, raza va întîlni peretele într-un punct care nu este

direct opus punctului pe unde a intrat, ci care este situat puțin mai jos (fig. 66). Diferența va fi foarte mică, dar ea totuși există ; ca atare, raza de lumină nu străbate ascensorul după o linie dreaptă, ci după o linie ușor curbată. Diferența este datorită distanței parcursă de ascensor în intervalul în care îl traversează raza de lumină.

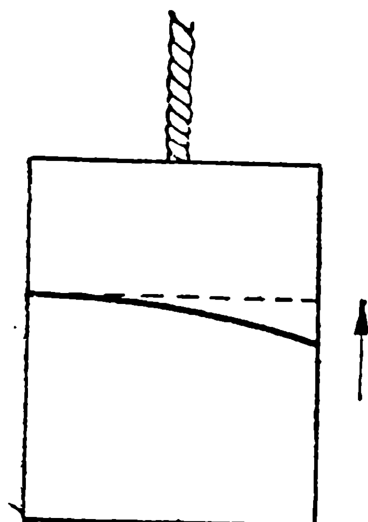


Fig. 66

Observatorul din interior, convins că asupra tuturor obiectelor din ascensor acționează un cîmp gravitațional, va declara : în ascensor nu intervin mișcări accelerate, ci numai acțiunea cîmpului gravitațional. O rază de lumină fiind fără greutate, nu va fi influențată de cîmpul gravitațional. Prin urmare, dacă este emisă în direcție orizontală, ea va întîlni peretele, dimpotrivă, într-un punct exact opus celui prin care a intrat.

Această discuție pare a indica modalitatea de a discerne între cele două puncte de vedere opuse, căci în cazul de față fenomenele ar fi diferite pentru cei doi observatori. Dacă nici una din cele două explicații pe care le-am redat acum nu conțin nimic ilogic, atunci toată argumentația anterioară se dovedește a fi inconsistentă ; ar rezulta că nu toate fenomenele pot fi descrise în două moduri consecvente, cu și fără cîmp gravitațional.

Dar, din fericire, raționamentul observatorului din interior conține o eroare gravă, care salvează concluzia noastră precedentă. El a afirmat că „o rază de lumină fiind fără greutate nu va fi influențată de cîmpul gravitațional". Ei bine, lucrul acesta nu poate fi adevărat ! O rază de lumină transportă energie și energia are masă. Or, fiecare masă inertă este atrasă de cîmpul gravitațional căci masa inertă și cea gravitațională sînt echivalente. O rază de lumină se va curba în cîmpul gravitațional întocmai ca un corp aruncat orizontal cu o viteză egală cu cea a luminii. Dacă observatorul din interior ar fi raționat corect, ținînd seama de curbarea razei de lumină în cîmpul gravitațional,

atunci rezultatele lui ar fi fost identice cu ale observatorului din exterior.

Cîmpul gravitațional, al Pămîntului, este evident prea slab pentru a curba o rază de lumină de ajuns ca să permită demonstrarea directă, experimentală, a acestei afirmații. Dar faimoasele experiențe efectuate în timpul eclipselor de Soare pun în evidență într-un mod concludent, deși indirect, influența cîmpului gravitațional asupra drumului unei raze de lumină.

Din aceste exemple rezultă că speranța formulării unei fizici relativiste este bine întemeiată. Dar, pentru aceasta, trebuie să tranșăm mai întîi problema gravitației.

Am văzut din exemplul ascensorului că există două descrieri consecvente. Putem presupune, sau nu, existența mișcării neuniforme. Cu ajutorul cîmpului gravitațional putem elimina mișcarea „absolută" din exemplele noastre. Dar această posibilitate dezbracă mișcarea neuniformă de caracterul ei absolut. Cîmpul gravitațional s-a dovedit apt să suprime cu desăvîrșire mișcarea absolută.

Stafiile mișcării absolute și a S.C.-ului inerțial pot fi, în sfîrșit, izgonite din fizică ; construirea unei noi fizici relativiste este posibilă. Experiențele noastre idealizate arată cum se împletește problema teoriei relativității generale cu cea a gravitației și de ce este atît de esențială pentru conexiunea lor, echivalența dintre masa inertă și cea gravifică. Este limpede că soluția dată problemei gravitaționale de teoria relativității generale trebuie să fie diferită de cea a lui Newton. Legile gravitației, la fel ca toate legile naturii, trebuie să fie formulate pentru orice S.C. posibile, în vreme ce legile mecanicii clasice, așa cum le formulase Newton, sînt valabile numai într-un S.C. inerțial.

§ 32. GEOMETRIA ȘI EXPERIENȚA

Exemplul care va urma este chiar mai fantastic decît cel cu ascensorul în cădere. Trebuie să atacăm o nouă problemă : cea a legăturii dintre teoria relativității generale și geometrie. Să începem cu descrierea unei lumi în care trăiesc numai ființe bidimensionale, spre deosebire de lu-

mea noastră, în care trăiesc ființe tridimensionale. Cinematograful ne-a familiarizat cu făpturile bidimensionale care evoluează pe un ecran bidimensional. Să admitem acum că aceste umbre, adică figurile de pe ecran, ar exista în realitate, că ar avea capacitatea de a gîndi, că și-ar crea știința lor proprie ; pentru ele spațiul geometric ar fi reprezentat de un ecran bidimensional. Aceste ființe ar fi incapabile să-și imagineze în mod corect un spațiu tridimensional după cum sîntem noi incapabili să ne imaginăm o lume cu patru dimensiuni. Ele ar putea curba o linie dreaptă, ele ar ști ce este un cerc dar nu ar fi în stare să construiască o sferă, deoarece aceasta ar însemna să iasă afară din ecranul lor bidimensional. Noi sîntem într-o situație asemănătoare. Sîntem capabili să abatem și să încovoiem linii și suprafețe, dar nu ne putem reprezenta un spațiu tridimensional deviat și curbat.

Trăind, gîndind și experimentînd, în cele din urmă, umbrele noastre vor ajunge să stăpînească eventual geometria euclidiană bidimensională. Ele vor putea atunci dovedi de exemplu că suma unghiurilor unui triunghi este de 180°. De asemenea, ele vor putea construi două cercuri concentrice, unul foarte mic, altul foarte mare. Vor putea stabili că raportul dintre circumferințele celor două cercuri este egal cu raportul razelor lor, rezultat de asemenea caracteristic pentru geometria euclidiană. Dacă ecranul ar fi infinit de mare, aceste umbre ar ajunge la concluzia că o dată pornite într-o călătorie drept înainte nu s-ar mai întoarce niciodată la punctul lor de plecare.

Să ne imaginăm acum că s-ar schimba condițiile de viață ale acestor ființe bidimensionale : să presupunem că cineva din exterior, din „a treia dimensiune“ le-ar transporta de pe ecran pe suprafața unei sfere cu o rază foarte mare. Dacă umbrele noastre sînt foarte mici față de întreaga suprafață, dacă ele nu dispun de nici un mijloc de comunicație la distanță și dacă nu se pot deplasa la mare depărtare, atunci ele nu vor sezisa schimbarea intervenită. In triunghiuri mici suma unghiurilor va fi tot de 180°. Două cercuri concentrice mici vor avea raportul razelor egal cu al circumferințelor. O călătorie în

linie dreaptă nu le-ar readuce niciodată la punctul lor de plecare.

Dar să admitem că, cu timpul, aceste umbre și-ar dezvolta cunoștințele teoretice și tehnice, că ar inventa mijloace de comunicație permițîndu-le să străbată rapid mari distanțe. Ele vor constata atunci că pornind într-o călătorie drept înainte, în cele din urmă, s-ar întoarce la punctul lor de plecare. „Drept înainte" însemnează de-a lungul unui cerc mare al sferei. Ele ar constata, de asemenea, că raportul circumferințelor a două cercuri concentrice nu este egal cu raportul razelor lor, dacă una din raze este mică iar cealaltă foarte mare.

Dacă ființele noastre bidimensionale sînt conservatoare, dacă au învățat geometria euclidiană de generații întregi pe vremea cînd nu puteau călători în depărtări și cînd geometria lor se dovedea conformă cu faptele observate, ele vor face toate eforturile posibile pentru a-i rămîne credincioase, chiar împotriva evidenței măsurărilor făcute de ele. Vor încerca să facă responsabilă fizica de aceste dezacorduri. Vor încerca să caute diferite motive de ordin fizic, de exemplu, diferențele de temperatură care deformează liniile și cauzează deviația de la geometria lui Euclid, dar mai curînd sau mai tîrziu vor găsi că există o cale mult mai logică și mai convingătoare pentru explicarea acestor fapte. În cele din urmă, ele vor înțelege că lumea lor este o lume finită, guvernată de principii geometrice diferite de cele pe care le învățaseră, că, în ciuda incapacității lor de a și-o imagina, lumea lor este suprafața bidimensională a unei sfere. În curînd ele își vor însuși noi principii de geometrie care, deși diferite de cele euclidiene, vor putea fi totuși formulate — pentru lumea lor bidimensională — tot atît de consecvent și de logic. Noua generație, acomodată cu geometria sferei, va găsi vechea geometrie euclidiană mai complicată și mai artificială, deoarece ea nu concordă cu observațiile.

Să ne întoarcem la ființele tridimensionale ale lumii noastre.

Ce se înțelege prin afirmația că spațiul nostru tridimensional are un caracter euclidian ? Sensul ei este că toate propozițiile, demonstrate logic, ale geometriei lui

Euclid pot fi confirmate prin experiențe reale. Din corpuri rigide sau raze de lumină putem construi obiecte care corespund obiectelor idealizate ale geometriei euclidiene. Muchia unei rigle sau o rază de lumină corespund dreptei ; suma unghiurilor unui triunghi construit din bare rigide subțiri este de 180°. Raportul razelor a două cercuri concentrice, construite din sîrmă subțire nedeformabilă, este egal cu cel al circumferințelor lor. Astfel interpretată, geometria euclidiană constituie un capitol al fizicii, chiar foarte simplu.

Dar ne putem imagina că s-au găsit totuși și diferențe ; de exemplu, că suma unghiurilor unui triunghi mare construit din bare, pe care am fi avut toate motivele să le considerăm rigide, nu este de 180°. Cum sîntem ferm convinși de posibilitatea reprezentării concrete a obiectelor geometriei euclidiene prin corpuri rigide, am atribui, probabil, unei forțe fizice această comportare anormală, neprevăzută, a barelor noastre. Am încerca să stabilim natura fizică a acestei forțe precum și influența ei asupra altor fenomene. Pentru a salva geometria euclidiană am învinui obiectele că nu sînt perfect rigide, că nu corespund deci exact obiectelor geometriei euclidiene. Am încerca să stabilim o reprezentare mai corectă a corpurilor care să se comporte potrivit prevederilor geometriei euclidiene. Dacă totuși nu am reuși să armonizăm geometria lui Euclid și fizica într-o reprezentare simplă și consecventă, am fi nevoiți să părăsim ideea că spațiul nostru este euclidian și să căutăm o imagine a realității bazată pe presupuneri mai generale asupra caracterului geometric al spațiului nostru.

Necesitatea unei astfel de reprezentări poate fi ilustrată printr-o experiență idealizată care să ne arate că o fizică relativistă reală nu se poate baza pe geometria euclidiană. Argumentarea noastră va utiliza rezultatele obținute anterior referitoare la S.C.-urile inerțiale și teoria relativității restrînse.

Să ne reprezentăm un disc mare pe care sînt trasate două cercuri concentrice, unul foarte mic, celălalt foarte mare (fig. 67). Să admitem că discul pe care se află un observator interior se rotește foarte repede față de un

observator exterior al cărui S.C. este inerţial. Observatorul din exterior va trasa în S.C.-ul său inerţial aceleaşi două cercuri, unul mic şi unul mare, în repaus faţă de S.C.-ul său, dar coincizînd cu cercurile de pe discul care se roteşte. Geometria euclidiană este valabilă în S.C.-ul său deoarece este inerţial, astfel că observatorul exterior va găsi raportul circumferinţelor egal cu cel al razelor. Care este situaţia observatorului de pe disc? Din punctul de vedere al fizicii clasice precum şi al teoriei relativităţii restrînse, S. C.-ul lui este interzis. Dacă vrem ca să formulăm din nou legile fizice, astfel încît ele să fie valabile în orice S.C., atunci trebuie să considerăm S.C.-ul observatorului de pe disc tot atît de legitim ca şi acela al observatorului din exterior. Vom urmări din exterior observatorul interior în operaţiile de măsurare a circumferinţelor şi a razelor pe discul în rotaţie. El foloseşte aceeaşi mică riglă ca şi cel din exterior. „Aceeaşi" însemnîd fie efectiv aceeaşi riglă, primită de la observatorul din exterior, fie una din alte două rigle care au aceeaşi lungime atunci cînd sînt în repaus în raport cu un S.C.

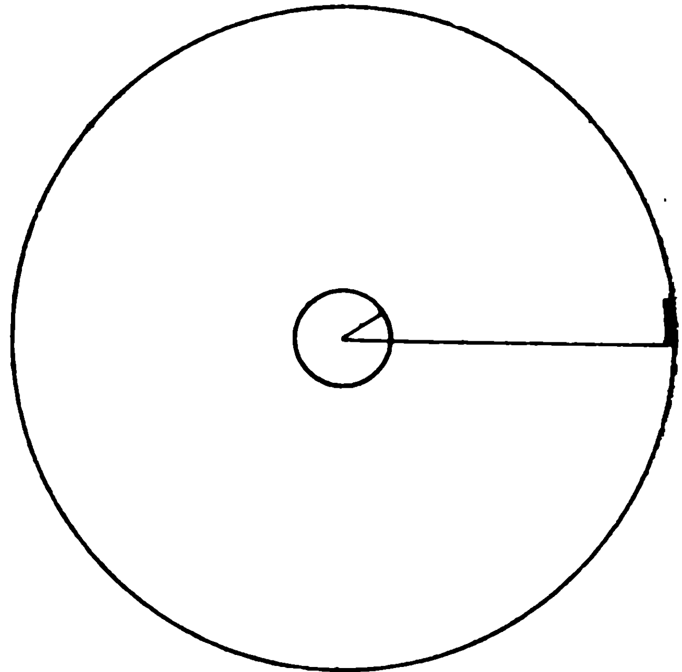


Fig. 67

Să presupunem că observatorul de pe disc îşi începe măsurătorile cu raza şi circumferinţa cercului mic. Rezultatele obţinute de el vor coincide cu cele ale observatorului din exterior. Axul în jurul căruia se roteşte discul trece prin centrul cercului. Părţile discului vecine cu centrul vor avea viteze foarte mici. Cu condiţia ca cercul să fie deajuns de mic, putem aplica deci liniştiţi mecanica clasică ignorînd teoria relativităţii restrînse. Aceasta înseamnă că rigla va avea aceeaşi lungime, atît pentru ob-

servatorul din exterior cît și pentru cel din interior ; prin urmare, rezultatele primelor două măsurători vor fi aceleași pentru amîndoi. Acum observatorul de pe disc măsoară raza cercului mare. Aplicată pe rază, rigla este în mișcare față de observatorul din exterior. Cu toate acestea ea nu se contractă, avînd aceeași lungime pentru amîndoi observatorii, deoarece mișcarea se face perpendicular pe direcția ei. Așadar, trei măsurători vor da același rezultat pentru amîndoi observatorii : ale celor două raze și a circumferinței cercului mic. Situația se schimbă însă pentru cea de a patra măsurătoare. Lungimea circumferinței mari va fi diferită pentru cei doi observatori. Aplicată pe circumferință, deci situată pe direcția mișcării, rigla va apărea observatorului din exterior contractată în comparație cu rigla lui din repaus. Pe cercul exterior viteza fiind mult mai mare decît pe cel interior, contracția nu mai poate fi neglijată. De aceea, aplicînd rezultatele teoriei relativității restrînse, ajungem la concluzia că lungimea circumferinței mari va fi diferită pentru cei doi observatori. Deoarece una din cele patru lungimi măsurate de cei doi observatori nu are aceeași valoare pentru amîndoi, raportul celor două raze nu va putea fi egal cu raportul celor două circumferințe pentru observatorul din interior. Cu alte cuvinte, observatorul de pe disc va constata că geometria euclidiană nu este valabilă în S.C.-ul său.

După ce a obținut acest rezultat, observatorul de pe disc ar putea declara că nu admite S.C.-urile în care geometria euclidiană nu este valabilă. Prăbușirea geometriei euclidiene s-ar datori rotației absolute, faptului că S.C.-ul său este rău și interzis. Argumentînd în felul acesta, el respinge însă ideea fundamentală a teoriei relativității generale. Dar dacă vrem să suprimăm mișcarea absolută și să menținem ideea teoriei relativității generale, atunci trebuie să construim fizica pe baza unei geometrii mai generale decît cea euclidiană. O dată ce am admis că toate S.C.-urile sînt permise, nu există nici un mijloc de a ne sustrage acestei concluzii.

Schimbările determinate de teoria relativității generale nu se pot însă mărgini numai la spațiu. În teoria re-

lativității restrînse avem ceasornice în repaus în fiecare S.C., cu același ritm și sincronizate, adică indicînd simultan același timp. Ce se întîmplă cu un ceasornic într-un S.C. neinerțial ? Experiența idealizată cu discul ne va folosi și acum. Observatorul exterior are în S.C.-ul său inerțial ceasornice mergînd toate în același ritm și perfect sincronizate. Observatorul din interior ia două ceasornice de același tip și le așază unul pe cercul mic interior, celălalt pe cercul exterior. Ceasornicul de pe cercul interior are o viteză foarte mică față de observatorul din exterior. Putem deci considera că ritmul lui va fi același cu cel al ceasornicului exterior. Dimpotrivă, ceasornicul de pe cercul mare are o viteză considerabilă, prin urmare își schimbă ritmul față de ceasornicele observatorului exterior și deci față de ceasornicul situat pe cercul mic. Așadar, cele două ceasornice care se rotesc vor avea ritmuri diferite și, aplicînd rezultatele teoriei relativității restrînse, constatăm din nou că în S.C.-ul în rotație nu putem face aranjamente asemănătoare cu cele din S.C.-ul inerțial.

Pentru a arăta limpede ce concluzii decurg din experiența aceasta și din cea precedentă, să reproducem din nou un dialog între vechiul fizician *V*, adept al fizicii clasice, și fizicianul modern *M*, înarmat cu cunoașterea teoriei relativității generale, *V*, fiind observatorul din exterior al cărui S.C. este inerțial, iar *M*, observatorul de pe discul care se rotește.

V. În S.C.-ul Dvs. geometria euclidiană nu este valabilă. Am urmărit măsurătorile Dvs. și sînt de acord că în S.C.-ul Dvs. raportul a două circumferințe nu este egal cu raportul razelor respective. Aceasta denotă că S.C.-ul Dvs. este un S.C. interzis. S.C.-ul meu are însă un caracter inerțial, ca atare eu pot aplica liniștit geometria euclidiană. Discul Dvs. este în mișcare absolută, prin urmare, din punctul de vedere al fizicii clasice, constituie un S.C. interzis în care legile mecanicii nu sînt valabile.

M. Nu vreau să știu de mișcarea absolută ; S.C.-ul meu este exact la fel de bun ca al Dvs. Ceea ce am observat eu a fost rotația Dvs. față de discul meu. Nimeni

nu mă poate împiedica să raportez toate mişcările la discul meu.

V. Bine, dar nu aţi simţit o forţă stranie care încearcă să vă îndepărteze de centrul discului ? Dacă discul Dvs. nu ar fi un fel de sistem de căluşei în rotaţie rapidă, cele două fenomene pe care le-aţi înregistrat, fără îndoială că n-ar fi avut loc : nici nu aţi fi simţit o forţă care vă împinge către periferie, nici nu aţi fi constatat că geometria euclidiană nu este aplicabilă în S.C.-ul Dvs. Aceste fapte nu sînt suficiente pentru a vă convinge că S.C.-ul Dvs. este în mişcare absolută ?

M. Cîtuşi de puţin. Bineînţeles că am înregistrat cele două fapte pe care le-aţi numit. Dar le pun pe seama unui cîmp gravitaţional cu structură specială care acţionează pe discul meu. Fiind îndreptat spre exteriorul discului, cîmpul acesta gravitaţional îmi deformează barele şi perturbează ritmul ceasornicelor mele. Cîmpul gravitaţional, geometria neeuclidiană, ceasornicele cu ritmuri diferite, toate acestea pentru mine sînt strîns legate. Acceptînd orice S.C., trebuie să presupunem în mod automat existenţa unui cîmp gravitaţional convenabil care-mi influenţează barele rigide şi ceasornicele.

V. Dar vă daţi seama ce greutăţi provoacă teoria Dvs. a relativităţii generale ? Îngăduiţi-mi să vă lămuresc punctul meu de vedere printr-un exemplu simplu, care nu este din domeniul fizicii. Să ne reprezentăm un oraş american, idealizat, constînd din străzi tăiate în unghi drept de bulevarde, paralele, atît străzile cît şi bulevardele fiind echidistante (fig. 68). În aceste condiţii, cvartalurile fiind toate egale ca mărime, se poate preciza lesne poziţia unuia dintre ele. Dar o asemenea construcţie ar fi imposibilă fără geometria euclidiană. Astfel, suprafaţa Pămîntului nostru n-am putea-o acoperi toată cu o asemenea reţea de străzi-bulevarde. Aruncînd o privire asupra

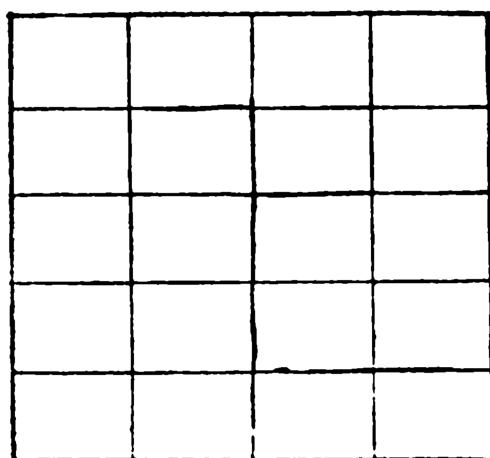


Fig. 68

globului vă veţi convinge de aceasta. Dar nici discul Dvs. nu l-am putea acoperi cu un astfel de „oraş american sistematizat". Dvs. susţineţi că barele Dvs. au fost deformate de cîmpul gravitaţional. Faptul că nu puteţi verifica teorema lui Euclid privitoare la egalitatea rapoartelor dintre raze şi circumferinţe indică limpede că încercînd să acoperiţi o întindere destul de mare a discului Dvs. cu o asemenea reţea de străzi - bulevarde, mai devreme sau mai tîrziu, vă veţi izbi de dificultăţi şi veţi ajunge la concluzia că acest lucru este imposibil Geometria Dvs. pe discul în rotaţie se aseamănă cu cea de pe o suprafaţă curbă pe care, evident, reţeaua de străzi-bulevarde nu poate fi extinsă pe o întindere oricît de mare. Drept exemplu mai fizic să considerăm un plan încălzit neuniform, avînd deci temperaturi diferite în regiuni diferite. Puteţi, oare, executa reţeaua de „paralele — perpendiculare" formată din mici bastonaşe de fier care se dilată cu temperatura ? Bineînţeles că nu. Ei bine, cîmpul gravitaţional le joacă barelor Dvs. acelaşi renghi ca şi variaţia de temperatură micilor bastonaşe de fier.

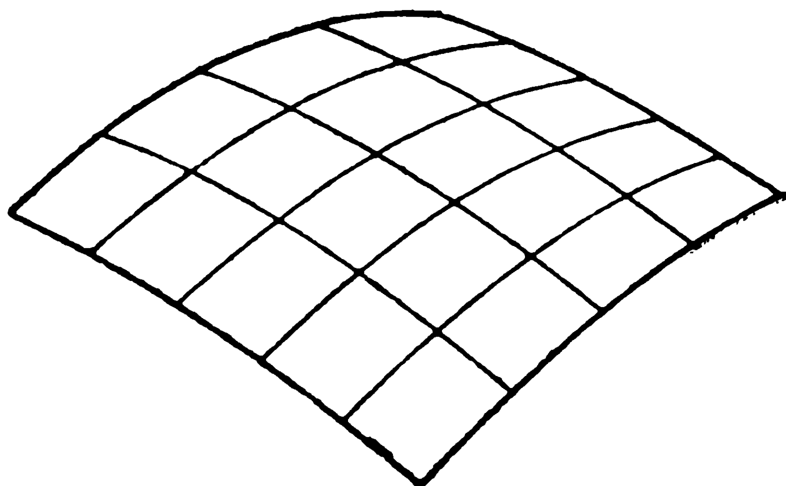


Fig. 69

M. Toate acestea nu mă sperie. Reţeaua „străzi-bulevarde" serveşte la determinarea poziţiei punctelor, după cum ceasornicul serveşte la ordonarea evenimentelor. Dar pentru aceasta oraşul nu trebuie să fie neapărat de tip american, el poate fi tot aşa de bine în stilul unui vechi oraş european. Imaginaţi-vă oraşul Dvs. idealizat construit din plastilină şi deformat după aceea. Şi în cazul acesta grupurile de case se pot foarte bine numerota, iar străzile şi bulevardele se pot încă identifica, deşi ele nu mai sînt drepte şi echidistante (fig. 69). Şi în cazul Pă–

minutului nostru, poziția unui punct poate fi precizată dacă i se indică longitudinea și latitudinea, deși meridianele și paralelele nu constituie o rețea de tipul „orașului american".

V. Eu văd totuși o dificultate. Dvs. sînteți nevoit să folosiți structura de „oraș european". Eu sînt de acord că ea vă permite să ordonați punctele sau evenimentele, dar această construcție vă va complica toate măsurările de distanțe. Ea nu va reda *proprietățile metrice* ale spațiului, cum face construcția mea. Să luăm un exemplu. Eu știu că în orașul meu american, pentru a străbate distanța a 10 cvartaluri, trebuie să străbat dublul distanței a cinci cvartaluri. Deoarece știu că toate pătratele sînt egale, pot determina indirect distanțele.

M. Este adevărat. In structura mea de „oraș european" eu nu pot măsura distanța direct prin numărul pătratelor deformate. Trebuie să mai știu ceva ; trebuie să cunosc proprietățile geometrice ale suprafeței mele. Fiecare știe că distanța a două puncte, situate unul la 0°, celălalt la 10° longitudine nu este aceeași de-a lungul Ecuatorului sau pe o paralelă din apropierea Polului Nord. Cu toate acestea, fiecare navigator știe să calculeze distanța dintre două asemenea puncte, deoarece el cunoaște proprietățile geometrice ale Pămîntului nostru. El poate evalua distanța fie prin calcul, bazîndu-se pe cunoașterea trigonometriei sferice, fie experimental, străbătînd amîndouă distanțele cu aceeași iuțeală. In cazul Dvs., întreaga problemă este banală, datorită faptului că toate străzile și bulevardele sînt echidistante. In cazul Pămîntului nostru, lucrurile sînt mai complicate ; cele două meridiane 0° și 10° se întîlnesc la polii Pămîntului și sînt mai depărtate la Ecuator. In mod analog, pentru a determina distanțele în orașul meu european eu trebuie să știu un element în plus față de Dvs., în orașul Dvs. american. Dar eu îmi pot asigura această cunoștință suplimentară studiind proprietățile geometrice ale continuumului meu în fiecare caz particular.

V. Toate acestea ne arată cît de incomodă este și ce complicații provoacă renunțarea la structura simplă a geometriei euclidiene în favoarea sistemului complicat pe

care sînteți obligat să-l folosiți Dvs. Este el cu adevărat necesar ?

M. Din păcate da, dacă vrem să aplicăm fizica noastră oricărui S.C. fără a recurge la misteriosul S.C. inerțial. Sînt de acord că aparatul meu matematic este mai complicat decît al Dvs., dar ipotezele mele fizice sînt mai simple și mai firești.

Discuția aceasta s-a limitat la continuumul bidimensional.

În realitate, în teoria relativității generale problema este și mai complicată întrucît obiectul controversei nu este continuumul bidimensional, ci continuumul cuadridimensional spațiu-timp. Dar ideile sînt aceleași ca cele schițate în cazul bidimensional. În teoria relativității generale nu putem folosi sistemul mecanic de bare paralele-perpendiculare și ceasornicele sincronizate ca în teoria relativității restrînse. Intr-un S.C. oarecare nu putem determina locul și momentul în care se produce un eveniment, servindu-ne de bare rigide și de ceasornice ritmice, sincronizate, ca în S.C.-urile inerțiale ale teoriei relativității restrînse. Cu barele noastre neeuclidiene și cu ceasornicele care au pierdut ritmul putem încă ordona evenimente, dar măsurători efective, care necesită bare rigide și ceasornice perfect ritmice, și sincronizate, pot fi executate numai într-un S.C. local inerțial. Pentru aceasta, întreaga teorie a relativității restrînse este valabilă. Dar S.C.-ul nostru este „bun" numai local, caracterul lui inerțial fiind limitat în spațiu și timp. Totuși, chiar în S.C.-ul nostru oarecare putem prevedea rezultatele măsurătorilor făcute în S.C.-ul local inerțial. Dar pentru aceasta trebuie să cunoaștem caracterul geometric al continuumului nostru spațiu-timp.

Experințele noastre idealizate indică numai caracterul general al noii fizici relativiste. Ele ne arată că problema fundamentală este cea a gravitației. Ele arată, de asemenea, că teoria relativității generale conduce la o generalizare a noțiunilor de timp și spațiu.

§ 33. RELATIVITATEA GENERALĂ ŞI VERIFICAREA EI

Teoria relativităţii generale încearcă să formuleze legi fizice valabile în toate S.C.-urile. Problema fundamentală a teoriei este cea a gravitaţiei. Această teorie face primul efort serios, de la Newton, în reformularea legii gravitaţiei. Este oare cu adevărat necesar acest lucru? Cunoaştem realizările teoriei lui Newton, marile succese ale astronomiei bazate pe legea sa, a gravitaţiei. Legea lui Newton continuă să constituie baza tuturor calculelor astronomice. Am cunoscut însă şi unele obiecţii aduse vechii teorii. Legea lui Newton este valabilă numai în S.C.-ul inerţial al fizicii clasice, în S.C.-ul definit, cum ne amintim, prin condiţia ca legile mecanicii să fie valabile în el. Forţa de atracţie gravitaţională dintre două mase depinde de distanţa dintre ele. Legătura dintre forţă şi distanţă este, după cum ştim, invariantă faţă de transformarea clasică. Dar această lege nu se poate încadra în sistemul relativităţii restrînse, deoarece distanţa nu este invariantă faţă de transformarea Lorentz. Am putea încerca, aşa cum am făcut cu atîta succes cu legile mişcării, să generalizăm legea gravitaţiei astfel încît să se încadreze în teoria relativităţii restrînse sau, cu alte cuvinte, să o formulăm astfel încît să fie invariantă faţă de transformarea Lorentz şi nu faţă de transformarea clasică. Însă legea gravitaţională a lui Newton a zădărnicit toate eforturile noastre de a o simplifica şi de a o încadra în schema teoriei relativităţii restrînse. Dar chiar dacă am reuşi să facem aceasta, ar fi necesar încă un pas: trecerea de la S.C.-ul inerţial al teoriei relativităţii restrînse la S.C.-ul oarecare al teoriei relativităţii generale. Pe de altă parte, experienţele idealizate cu ascensorul în cădere indică lămurit că nu avem nici o şansă de a formula teoria relativităţii generale fără a soluţiona şi problema gravitaţiei. Consideraţiile de mai sus permit să înţelegem de ce soluţiile problemei gravitaţionale, în fizica clasică şi în relativitatea generală, vor fi diferite.

Am încercat din nou să indicăm calea care duce la teoria relativităţii generale şi motivele care ne determină să ne schimbăm încă o dată vechile concepţii. Vom

indica , fără a intra în structura formală a teoriei relativității generale, unele aspecte ale noii teorii a gravitației. Față de tot ce s-a spus pînă acum, nu va fi prea greu să sezisăm natura diferențelor dintre noua și vechea teorie.

1. Ecuațiile gravitației din teoria relativității generale pot fi aplicate orcărui S.C. Folosirea unui S.C. particular într-un caz dat este numai o chestiune de comoditate ; teoretic, toate S.C.-urile sînt permise. Eliminînd gravitația, cădem automat peste S.C.-ul inerțial al teoriei relativității restrînse.

2. Legea gravitației a lui Newton leagă mișcarea unui corp, aici și acum, de acțiunea simultană (din același moment) a altui corp situat la mare distanță. Legea aceasta constituie un prototip pentru întreaga noastră concepție mecanicistă. Dar concepția mecanicistă a dat faliment. Noul prototip al legilor naturii l-am descoperit în ecuațiile lui Maxwell. Ecuațiile lui Maxwell sînt legi de structură. Ele leagă evenimente care au loc, acum și aici, cu evenimente care se vor produce, puțin mai tîrziu, în imediata apropiere. Ele descriu variațiile cîmpului electromagnetic. Noile noastre ecuații gravitaționale sînt, de asemenea, legi de structură care descriu variațiile cîmpului gravitațional. Din punctul de vedere formal, trecerea de la legea gravitației a lui Newton la teoria relativității generale are oarecum, caracterul tranziției de la teoria fluidelor electrice și legea lui Coulomb la teoria lui Maxwell.

3. Universul nostru nu este euclidian. Natura geometrică a lumii noastre este determinată de configurația maselor și de viteza lor. Ecuațiile gravitației din teoria relativității generale încearcă să pună în lumină proprietățile geometrice ale lumii noastre.

Să presupunem, pentru moment, că am reușit să îndeplinim pînă la capăt programul teoriei relativității generale. Nu cumva sîntem amenințați, în cazul acesta, să împingem speculațiile prea departe de realitate ? Știm cît de bine explică vechea teorie observațiile astronomice. Există vreo posibilitate de a arunca o punte între noua teorie și observație ? Orice speculație trebuie verificată prin experiență și orice rezultat, oricît de ademenitor ar fi el, trebuie respins dacă nu corespunde

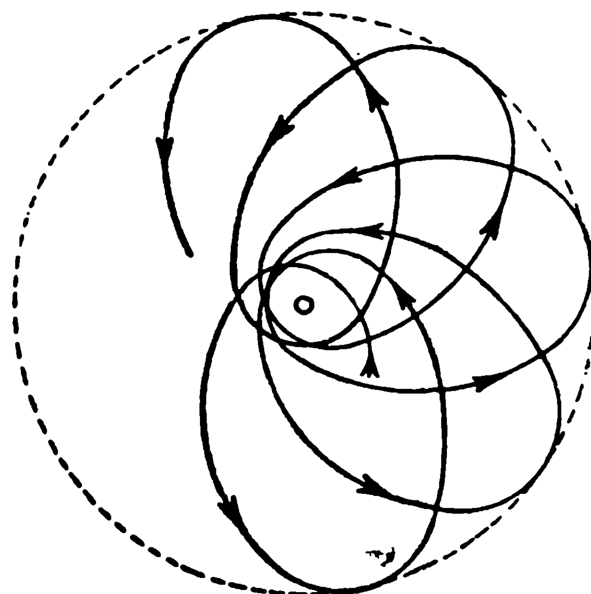
faptelor. Cum a făcut față confruntării cu experiența noua teorie a gravitației ? La această întrebare se poate răspunde printr-o propoziţiune : Vechea teorie reprezintă un caz limită al celei noi. Dacă forțele gravitaționale sînt relativ slabe, legile lui Newton reprezintă o bună aproximație a legilor noi ale gravitației. Prin urmare, toate observațiile care confirmă vechea teorie confirmă totodată și teoria relativității generale ; regăsim vechea teorie de pe planul superior al celei noi.

Chiar dacă în favoarea noii teorii n-ar pleda nici o observaţie suplimentară, dacă explicațiile ei n-ar avea nici o calitate în plus față de cele ale vechii teorii, mărginindu-se doar să fie tot atît de bune ca ele, chiar în cazul acesta, dacă am fi puşi în situația de a alege între cele două teorii, ar trebui s-o preferăm pe cea nouă. În adevăr, chiar dacă din punctul de vedere formal ecuațiile noii teorii sînt mai complicate, ele sînt mai simple din punctul de vedere al principiilor fundamentale, al ipotezelor care stau la baza lor. Cele două stafii : timpul absolut și sistemul inerțial au dispărut. Firul conducător esențial al echivalenței dintre masa grea și cea inertă a fost urmat pînă la capăt. Ne putem dispensa de orice presupunere privitoare la dependența forțelor de gravitație de distanță. Ecuațiile gravitaționale au forma unor legi de structură, formă cerută tuturor legilor fizicii începînd de la marile realizări ale teoriei cîmpului.

Din noile legi ale gravitației pot fi deduse unele consecințe noi, neconținute în legea gravitațională a lui Newton. Una din ele, curbarea unei raze de lumină într-un cîmp gravitațional, am și amintit-o. Vom menționa acum alte două consecințe.

Dacă vechile legi rezultă din cele noi cînd forțele de gravitație sînt slabe, în schimb, abaterile de la legea newtoniană a gravitației sînt de așteptat numai pentru forțe de gravitație relativ intense. Să examinăm sub acest aspect cazul sistemului nostru solar. Planetele, printre care și Pămîntul nostru, se mișcă în jurul Soarelui pe orbite eliptice ; planeta cea mai apropiată de Soare este Mercur. Distanța dintre Soare şi Mercur fiind mai mică decît cea dintre Soare și orice altă planetă, forța de a-

tracţie dintre ele va fi cea mai intensă. Prin urmare, dacă există vreo speranţă să găsim o abatere de la legea lui Newton, şansele cele mai mari le avem în cazul planetei Mercur. Dacă, potrivit teoriei clasice, orbita descrisă de planeta Mercur este de acelaşi tip ca a oricărei alte planete, exceptînd faptul că ea este cea mai apropiată de Soare, în schimb, potrivit teoriei relativităţii generale mişcarea ar trebui să se abată puţin de la elipsă. Şi anume: concomitent cu învîrtirea lui Mercur în jurul Soarelui ar trebui ca şi elipsa pe care o descrie el să se rotească foarte lent faţă de S.C.-ul legat de Soare (fig. 70). Această rotire a elipsei reprezintă efectul prevăzut de teoria relativităţii generale, căruia noua teorie îi prezice şi mărimea. Elipsa lui Mercur ar urma să efectueze o rotaţie completă în 3 milioane de ani. Se vede cît de infim este acest efect, şi cît de deşartă ar fi încercarea de a-l pune în evidenţă în cazul planetelor mai îndepărtate de Soare.


Fig. 70

Abaterea traiectoriei planetei Mercur de la elipsă era cunoscută înainte de formularea teoriei relativităţii generale, dar nu i se putuse găsi nici o explicaţie. Pe de altă parte, teoria relativităţii generale a fost elaborată în afara oricărei preocupări în legătură cu această problemă particulară. De abia mai tîrziu s-a tras concluzia privitoare la rotirea elipsei în cursul revoluţiei unei planete în jurul Soarelui. În cazul lui Mercur, teoria a explicat cu succes abaterea mişcării de la legea lui Newton.

Mai există încă o concluzie dedusă din teoria relativităţii generale, care a fost comparată cu experienţa. Am văzut că un ceasornic aşezat pe cercul mare al discului în rotaţie are un ritm diferit de cel al unui ceasornic aşezat pe cercul mic. Asemănător, rezultă din teoria relativi-

tății că întrucît influența cîmpului gravitațional este mult mai puternică pe Soare decît pe Pămînt, un ceasornic situat pe Soare are un ritm diferit de cel al unui ceasornic situat pe Pămînt.

Am remarcat la pag. 80 că sodiul incandescent emite lumină galbenă, omogenă, cu o lungime de undă determinată. În această radiație atomul își exteriorizează unul din ritmurile sale ; atomul poate fi considerat ca un ceasornic, fiecare din lungimile de undă pe care le emite reprezentînd unul din ritmurile lui. Potrivit teoriei relativității generale, lungimea de undă a unei radiații emise de către atomul de sodiu situat pe Soare trebuie să fie ceva mai mare decît cea a radiației corespunzătoare emise de un atom de sodiu pe Pămînt.

Problema verificării prin observație a consecințelor teoriei este complicată și, pînă în prezent, ea nu este nici pe departe definitiv soluționată. Dat fiind însă că noi ne ocupăm numai cu ideile fundamentale, nu intenționăm să intrăm mai adînc în această chestiune, mulțumindu-ne doar să afirmăm că, pînă în prezent, verdictul observației pare să confirme concluziile teoriei relativității generale.

§ 34. CÎMP ȘI MATERIE

Am văzut cum și de ce s-a prăbușit punctul de vedere mecanicist. Nu a fost cu putință să se explice toate fenomenele prin acțiunile unor forțe simple ce se exercită între particule invariabile. Primele noastre încercări de a depăși punctul de vedere mecanicist și de a introduce conceptul de cîmp au obținut cel mai mare succes în domeniul fenomenelor electromagnetice. S-au formulat astfel legile de structură ale cîmpului electromagnetic, legi care leagă între ele evenimente foarte apropiate în spațiu și timp. Aceste legi concordă cu sistemul teoriei relativității restrînse, doarece ele sînt invariante față de transformarea Lorentz. Mai tîrziu, teoria relativității generale a formulat legile gravitației. Ele sînt tot legi de structură, care descriu cîmpul gravitațional dintre particulele materiale. A fost, de asemenea, ușor să se generalizeze legile lui Maxwell

astfel încît ele să se poată aplica oricărui S.C. întocmai ca legile gravitației din teoria relativității generale.

Avem două realități : *materia* și *cîmpul*. Este evident că, spre deosebire de fizicienii de la începutul secolului trecut, noi nu putem concepe o fizică construită în întregime pe conceptul de materie. În stadiul actual acceptăm ambele concepte. Putem, însă, considera materia și cîmpul ca fiind realități distincte și diferite ca natură ? Fiind dată o mică particulă (de materie) ne-am putea imagina, în mod naiv, o suprafață definită începînd de la care particula ar lua sfîrșit și ar începe cîmpul ei gravitațional. În această reprezentare, trecerea de la regiunea în care sînt valabile legile cîmpului la regiunea în care este prezentă materia s-ar face brusc. Care ar fi, în cazul acesta, criteriile fizice de deosebire a materiei de cîmp ? Înainte de a fi învățat ceva despre teoria relativității am fi fost înclinați să răspundem astfel la această întrebare : materia are masă în vreme ce cîmpul nu are. Cîmpul reprezintă energie, materia reprezintă masă. Dar, în lumina noilor cunoștințe dobîndite, trebuie să considerăm nesatisfăcător acest răspuns. Din teoria relativității știm că materia reprezintă un imens rezervor de energie și că energia reprezintă materie. Prin urmare, nu putem stabili o distincție calitativă între materie și cîmp, căci distincția dintre masă și energie nu este calitativă. Cea mai mare parte a energiei este concentrată în materie, dar cîmpul care înconjoară particula reprezintă tot energie, deși într-o cantitate incomparabil mai mică. Am putea spune : avem materie unde concentrarea energiei este mare și cîmp unde concentrarea energiei este mică. Dar, în cazul acesta, diferența dintre materie și cîmp este mai degrabă cantitativă decît calitativă. N-are deci nici un sens să considerăm că materia și cîmpul sînt două calități cu totul diferite una de alta. Nu ne putem imagina o suprafață definită care să constituie o demarcație netă între cîmp și materie.

Aceeași dificultate intervine și în cazul sarcinii și a cîmpului ei. În concluzie, pare imposibil să găsim un criteriu calitativ plauzibil pentru a discerne între materie și cîmp sau între sarcină și cîmp.

Legile noastre de structură, adică legile lui Maxwell, și legile gravitației nu mai sînt valabile în cazul concentrărilor intense ale energiei sau, cum se spune, în regiunile unde sînt prezente izvoare ale cîmpului, adică sarcini electrice, respectiv materie. Dar n-am putea noi oare, grație unei ușoare modificări, să facem ecuațiile noastre valabile pretutindeni, chiar și în regiunile în care energia este extrem de concentrată ?

Nu putem construi fizica numai pe baza conceptului de materie. După stabilirea echivalenței dintre masă și energie, despicarea în materie și cîmp are un caracter artificial, neputînd fi clar definită. Nu am putea elimina conceptul de materie, construind o fizică bazată numai pe conceptul de cîmp ? Ceea ce dă simțurilor noastre impresia de materie este în realitate o mare concentrare de energie într-un spațiu relativ mic. Am putea considera materie acele regiuni ale spațiului în care cîmpul este extrem de puternic. S-ar putea crea astfel un nou cadru filosofic. Obiectivul final ar fi explicarea tuturor evenimentelor din natură prin legi de structură valabile întotdeauna și pretutindeni. În această interpretare, o piatră în zbor ar reprezenta un cîmp variabil ale cărui stări de maximum de intensitate s-ar propaga în spațiu cu viteza pietrei. În noua noastră fizică nu ar fi loc și pentru cîmp și pentru materie, cîmpul fiind singura realitate. Această nouă concepție ne este sugerată de marile realizări ale fizicii cîmpului, de succesele obținute grație exprimării legilor electricității, magnetismului și gravitației sub formă de legi de structură și, în sfîrșit, de echivalența dintre masă și energie. Așadar, ultima noastră problemă ar fi modificarea legilor cîmpului astfel încît să devină aplicabile pentru regiunile în care energia are o concentrare uriașă.

Dar pînă acum nu am reușit să aducem la îndeplinire acest program în mod plauzibil și consecvent. Urmează ca viitorul să hotărască dacă el este sau nu realizabil. În stadiul actual, în toate construcțiile noastre teoretice, trebuie să continuăm să luăm în considerare două realități : cîmpul și materia.

Ne mai așteaptă o serie de probleme fundamentale.

Ştim că toată materia este alcătuită din puţine feluri de particule. Cum intervin aceste particule elementare în construcţia diferitelor forme ale materiei. Cum interacţionează aceste particule elementare cu cîmpul ? Căutîndu-se un răspuns la aceste probleme, au fost introduse în fizică idei noi, ideile *teoriei cuantelor.*

Rezumăm :

O nouă noţiune apare în fizică, cea mai importantă invenţie de la Newton încoace : cîmpul. A fost necesar un mare efort de imaginaţie ştiinţifică pentru a sezisa că noţiunea esenţială pentru descrierea fenomenelor fizice nu este sarcina sau particula, ci cîmpul care domneşte în spaţiul dintre sarcini şi particule. Conceptul de cîmp este încununat de un succes strălucit şi conduce la formularea ecuaţiilor lui Maxwell care descriu structura cîmpului electromagnetic şi care guvernează atît fenomenele electrice cît şi pe cele optice.

Teoria relativităţii s-a născut din problemele cîmpului. Contrazicerile şi inconsecvenţele vechilor teorii ne-au constrîns să atribuim noi proprietăţi continuumului spaţiu-timp, scena tuturor evenimentelor din lumea noastră fizică.

Teoria relativităţii se dezvoltă în două etape. Prima etapă conduce le ceea ce se numeşte teoria relativităţii restrînse care se aplică numai sistemelor de coordonate inerţiale adică sistemelor în care este valabilă legea inerţiei, aşa cum fusese ea formulată de către Newton. Teoria relativităţii restrînse se bazează pe două ipoteze fundamentale :

legile fizicii sînt aceleaşi în toate sistemele de coordonate care se mişcă uniform unul faţă de altul ;

viteza luminii are întotdeauna aceeaşi valoare.

Din aceste ipoteze, confirmate pe deplin de experienţă, sînt deduse proprietăţile barelor în mişcare şi ale ceasornicelor, variaţiile lor în lungime şi ritm depinzînd de viteză. Teoria relativităţii modifică legile mecanicii. Vechile legi nu mai sînt valabile dacă viteza particulei în mişcare se apropie de cea a luminii. Noile legi valabile pentru corpurile în mişcare, aşa cum au fost ele reformulate de teoria relativităţii, sînt confirmate strălucit de

experiență. O altă consecință a teoriei relativității restrînse este legătura dintre masă și energie. Masa este energie și energia are masă. Cele două legi de conservare, a masei și a energiei, sînt contopite de teoria relativității într-una singură, anume, legea de conservare a masei-energie.

Teoria relativității generale face o analiză și mai aprofundată a continuumului spațiu-timp. Valabilitatea teoriei nu este restrînsă la sistemele de coordonate inerțiale. Teoria atacă problema gravitației și formulează noi legi de structură pentru cîmpul gravitațional. Ea ne obligă să analizăm rolul jucat de geometrie în descrierea lumii fizice. Ea consideră esențială egalitatea dintre masa gravifică și cea inertă, nu întîmplătoare ca în mecanica clasică. Consecințele experimentale ale teoriei relativității generale se deosebesc, numai în mică măsură, de cele ale mecanicii clasice. Ele fac față verificărilor experimentale ori de cîte ori confruntarea este posibilă. Dar superioritatea teoriei rezidă în consistența ei interioară, și în simplicitatea ipotezelor ei fundamentale.

Teoria relativității scoate în evidență importanța conceptului de cîmp în fizică. Totuși, nu am reușit încă să formulăm o fizică a cîmpului, pură. În stadiul actual sîntem încă obligați să acceptăm atît existența cîmpului cît și a materiei.

IV TEORIA CUANTELOR

Continuitate, discontinuitate. — Cuante elementare de materie și de electricitate. — Cuante de lumină. — Spectre luminoase. — Unde de materie. — Unde de probabilitate — Fizica și realitatea.

§ 35. CONTINUITATE, DISCONTINUITATE

Sub ochii noștri este desfășurat un plan al orașului New-York și al împrejurimilor sale. Ne punem întrebarea : În care puncte ale acestui plan se poate ajunge cu trenul? După ce extragem aceste puncte dintr-un mers al trenurilor, le însemnăm pe plan. Să schimbăm acum întrebarea : în care puncte se poate ajunge cu automobilul ? Pentru a le găsi este de ajuns să reprezentăm, prin linii, pe plan toate șoselele care pleacă din New-York, căci oricare punct situat pe una din aceste șosele poate fi efectiv atins, călătorind cu automobilul. În amîndouă cazurile avem sisteme de puncte. Însă în primul caz ele reprezintă stații de cale ferată și, ca atare, sînt răzlețe, în vreme ce în al doilea, ele sînt toate punctele situate în lungul liniilor care reprezintă șoselele. Să trecem acum la altă întrebare ; la ce distanță de New-York sau, mai riguros, de un anumit loc din New-York se găsește un asemenea punct ? În primul caz, acestor distanțe le corespund numere diferite. Aceste numere diferă între ele prin salturi neregulate, dar întotdeauna finite. Vom exprima aceasta spunînd că distanțele de la New-York pînă la locurile unde se poate ajunge cu trenul variază în mod *discontinuu*, în vreme ce distanțele pînă la locurile la care se poate ajunge cu automobilul pot varia în trepte oricît de mici, ele pot varia în mod *continuu*. Va-

riațiile distanțelor pot fi făcute arbitrar de mici în cazul automobilului, nu însă și în cazul trenului.

Extracția unei mine de cărbuni poate varia în mod continuu. Cantitatea de cărbune produsă poate fi sporită, sau redusă, în trepte arbitrar de mici. Dar numărul minerilor folosiți poate varia numai discontinuu. Ar fi cu totul absurd să spunem : „de ieri, numărul salariaților a crescut cu 3,783".

O persoană căreia i s-ar cere să spună cîți bani are în buzunar nu poate spune un număr cu mai mult de două zecimale. O sumă de bani poate varia numai în salturi, în mod discontinuu. În America, cea mai mică monedă, să-i spunem *cuanta elementară* pentru moneda americană, este centul. Cuanta elementară pentru moneda engleză este „farthing-ul" care valorează numai jumătate din cuanta elementară americană. Avem exemplul a două cuante elementare ale căror valori pot fi comparate între ele. Raportul valorilor lor are o semnificație definită, dat fiind că una din ele valorează de două ori mai mult decît cealaltă.

Putem spune : unele cantități pot varia continuu, altele numai discontinuu, în trepte care nu mai pot fi micșorate. Aceste cantități indivizibile se numesc *cuante elementare* ale mărimii particulare la care se referă.

Cînd cîntărim cantități mari de nisip putem considera că masa lui este continuă deși structura lui este, evident, granulară. Dacă nisipul ar fi însă foarte prețios, și dacă balanțele folosite ar fi foarte sensibile, ar trebui să ținem seama de faptul că masa variază întotdeauna printr-un multiplu al unui grăunte. Masa aceasta a unui grăunte ar reprezenta cuanta noastră elementară. Din acest exemplu, vedem cum, mărind precizia măsurărilor, poate fi pus în evidență caracterul discontinuu al unei cantități considerată pînă atunci continuă.

Dacă ni s-ar cere să caracterizăm ideea principală a teoriei cuantelor într-o singură frază am putea spune : *trebuie să admitem că anumite cantități fizice, considerate pînă în prezent continue, sînt în realitate compuse din cuante elementare.*

Domeniul de fapte îmbrățișat de teoria cuantelor este

foarte mare. Aceste fapte au fost puse în evidență de către tehnica extrem de dezvoltată a experiențelor moderne. Cum noi nu putem nici executa nici descrie experiențele fundamentale, vom fi nevoiți, deseori, să menționăm rezultatele lor în mod dogmatic. Scopul nostru este să explicăm numai principiile pe care se bazează această teorie.

§ 36. CUANTE ELEMENTARE DE MATERIE ŞI DE ELECTRICITATE

În imaginea despre materie, dată de teoria cinetică, toate elementele sînt construite din molecule. Să luăm cazul cel mai simplu al elementului cel mai uşor, hidrogenul. La pag. 55 am arătat că studiul mişcării browniene permite determinarea masei unei molecule de hidrogen. Valoarea ei este

$$0,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,003\ \ 3 \text{ grame.}$$

Aceasta înseamnă că masa este discontinuă. Masa unei cantități de hidrogen poate varia numai printr-un număr întreg de trepte mici, fiecare corespunzînd masei unei singure molecule de hidrogen. Dar procesele chimice arată că molecula de hidrogen poate fi scindată în două părți, sau cu alte cuvinte că molecula de hidrogen este compusă din doi atomi. In procesele chimice, rolul principal îl joacă atomul şi nu molecula. Impărțind numărul de mai sus la 2 găsim masa unui atom de hidrogen. Ea este de aproximativ :

$$0,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,001\ \ 7 \text{ grame.}$$

Masa este o cantitate discontinuă. Evident, nu este însă nevoie să ținem seama de acest lucru cînd cîntărim un corp ; chiar cele mai sensibile balanțe sînt departe de a atinge gradul de precizie necesar pentru a putea pune în evidență discontinuitatea masei.

Să ne întoarcem la un fapt bine cunoscut. O sîrmă este legată la o sursă de curent. Prin fir începe să treacă un curent de la potențialul mai înalt la potențialul mai

scăzut. Ne amintim că multe fapte experimentale fuseseră explicate cu ajutorul teoriei simple a fluidelor electrice, care ar curge prin fir. Ne amintim de asemenea (pag. 65) că fusese numai o chestiune de convenție să admitem că fluidul pozitiv curge de la potențialul mai înalt la cel mai jos, sau că fluidul negativ curge de la potențialul mai jos la cel mai înalt. Să facem abstracție, pentru moment, de toate progresele ulterioare realizate pe baza conceptelor de cîmp. Menținîndu-ne chiar în cadrul teoriei fluidelor electrice, mai rămîn de lămurit unele probleme. Cum indică termenul de „fluid", la început electricitatea fusese privită ca avînd un caracter continuu. Potrivit acestor concepții vechi, încărcarea electrică putea fi variată în trepte arbitrar de mici. Nu era necesar să se presupună existența unor cuante elementare de electricitate. Cuceririle teoriei cinetice au pregătit însă terenul pentru o nouă întrebare : există cuante elementare de fluid electric ? O a doua chestiune care trebuie lămurită este dacă curentul consistă din curgerea fluidului negativ, a celui pozitiv sau a ambelor fluide ?

Ideea tuturor experințelor menite să răspundă la această întrebare a fost de a extrage fluidul electric din sîrmă și a-l sili să treacă prin vid, a-l desface din orice asociere cu materia și a-i cerceta apoi proprietățile care, în aceste condiții, ar urma să apară cel mai clar. Multe asemenea experiențe au fost efectuate către sfîrșitul secolului al XIX-lea. Inainte de a explica principiul, cel puțin al unuia din dispozitivele experimentale folosite, vom lua în considerare numai rezultatele. Fluidul electric care curge prin sîrmă este negativ și este deci dirijat de la potențialul mai scăzut către cel mai înalt. Dacă am fi știut aceasta de la început, cînd s-a creat teoria fluidelor electrice, cu siguranță că am fi schimbat între ele cuvintele, numind pozitivă electricitatea barei de ebonită și negativă pe cea a barei de sticlă. Ni s-ar fi părut atunci mai convenabil să considerăm pozitiv fluidul care trece prin fir. Dar, deoarece presupunerea noastră inițială a fost greșită, acum sîntem nevoiți să ne acomodăm cu acest inconvenient. Următoarea chestiune importantă este dacă structura acestui fluid negativ este „granulară", dacă el

este sau nu compus din cuante electrice. Un alt șir de experiențe, independente unele de altele, au arătat că existența unei cuante elementare de electricitate negativă este neîndoielnică. Fluidul electric negativ este constituit din grăunțe, întocmai ca o plajă din fire de nisip, sau o casă din cărămizi. Cel mai clar a formulat acest rezultat J. J. Thomson, în urmă cu vreo 40 de ani. Aceste cuante elementare de electricitate negativă se numesc *electroni*. Prin urmare, orice sarcină electrică negativă este compusă dintr-o puzderie de sarcini elementare adică de electroni. Sarcina negativă, întocmai ca masa, poate varia numai discontinuu. Sarcina electrică elementară este însă atît de mică încît în multe cercetări este posibil și uneori chiar convenabil să o considerăm ca o cantitate continuă. Astfel, teoriile atomice și electronice introduc în știință cantități fizice discontinue care pot varia numai în salturi.

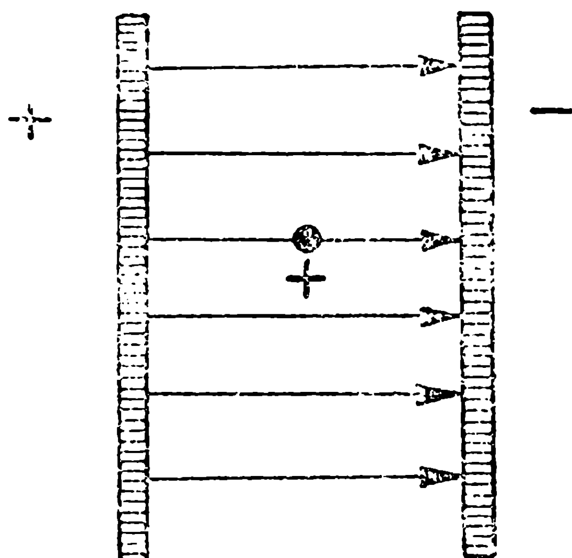


Fig. 71

Să introducem două plăci metalice paralele într-o incintă din care s-a scos tot aerul (fig. 71). Fie una din plăci încărcată pozitiv, cealaltă negativ. O sarcină de probă, pozitivă, introdusă între cele două plăci va fi respinsă de placa încărcată pozitiv și atrasă de placa încărcată negativ. Prin urmare, liniile de forță ale cîmpului electric vor fi îndreptate de la placa încărcată pozitiv către cea încărcată negativ. Forța care ar acționa asupra unui corp de probă încărcat negativ ar avea sensul opus. Dacă plăcile sînt de ajuns de mari, liniile de forță dintre ele vor fi la fel de dese pretutindeni ; oriunde ar fi așezat corpul de probă, forța deci și densitatea liniilor de forță ar fi aceleași. Electronii introduși undeva între plăci s-ar comporta ca niște picături de ploaie în cîmpul gravitațional al Pămîntului, deplasîndu-se paralel, unul față de altul, de la placa încărcată negativ

către cea încărcată pozitiv. Există multe dispozitive experimentale capabile să pună în libertate o ploaie de electroni într-un asemenea cîmp care îi va orienta la fel pe toți. Unul dintre cele mai simple procedee este de a introduce o sîrmă incandescentă între plăcile încărcate. Un astfel de fir înroșit emite electroni care sînt apoi orientați de liniile de forță ale cîmpului exterior. Pe acest principiu sînt bazate, de exemplu, tuburile de radio, familiare tuturor.

Multe experiențe foarte ingenioase au fost efectuate cu fascicule de electroni. S-a studiat devierea (traiectoriilor) lor în diferite cîmpuri electrice și magnetice exterioare. S-a putut chiar izola un singur electron, determinîndu-i-se astfel sarcina și masa adică rezistența lui inerțială față de acțiunea unei forțe exterioare. Aici ne vom mărgini să indicăm valoarea masei unui electron. S-a stabilit că ea este cam de *2 000 de ori mai mică decît masa unui atom de hidrogen.* Astfel masa unui atom de hidrogen, cît ar fi ea de mică, poate fi considerată mare în comparație cu masa unui electron. Din punctul de vedere al unei teorii consecvente a cîmpului, întreaga masă, adică întreaga energie a unui electron, ar fi energia cîmpului său. Intensitatea lui este mare numai în interiorul unei mici sfere, iar la mare distanță de „centrul“ unui electron cîmpul este slab.

Am spus mai sus că atomul oricărui element este ultima lui subdiviziune. Această afirmație a fost mult timp luată drept bună. Astăzi ea este, însă, depășită. Știința și-a făurit o nouă imagine care arată limitele celei vechi. În prezent, aproape că nu există concepție a fizicii mai bine fundată pe fapte decît cea privitoare la structura complexă a atomului. Prima etapă a fost recunoașterea faptului că electronul, cuanta elementară de fluid electric negativ, este și unul din componenții atomului, una din cărămizile elementare din care este construită toată materia. Procedeul citat mai înainte, al sîrmei încălzite care emite electroni, este numai unul din numeroasele procese prin care se pot extrage din materie aceste particule. Această concluzie care leagă strîns problema struc-

turii materiei cu cea a electricității, decurge fără nici o îndoială din multe fapte experimentale independente.

Este relativ ușor să extragem dintr-un atom o parte din electronii care îl compun. Aceasta se poate realiza nu numai prin încălzire, ca în exemplul de mai sus al sîrmei incandescente, ci și prin alte procedee, de exemplu, prin bombardarea atomilor cu alți electroni.

Să presupunem că am introdus în hidrogen rarefiat un fir metalic subțire, încălzit la roșu. Firul va emite în toate direcțiile electroni, cărora, sub acțiunea unui cîmp electric exterior, li se va imprima o viteză dată. Un electron își mărește viteza întocmai ca o piatră care cade în cîmpul gravitațional. Prin metoda aceasta, putem obține un fascicul de electroni care se deplasează cu o anumită viteză într-o direcție anumită. Astăzi putem imprima electronilor viteze comparabile cu cea a luminii, supunîndu-i acțiunii unor cîmpuri foarte intense. Ce se întîmplă dacă un fascicul de electroni, cu o anumită viteză, ciocnește o moleculă de hidrogen ?

Dacă electronul este destul de rapid, izbitura lui va determina nu numai spargerea moleculei de hidrogen în cei doi atomi ai săi, ci și zmulgerea unui electron unuia din cei doi atomi.

Să admitem că electronii intră în constituția materiei. Atunci urmează că un atom căruia i s-a zmuls un electron nu poate fi considerat neutru din punctul de vedere electric. Dacă înainte de pierderea unei sarcini elementare el fusese neutru, atunci el nu mai poate fi și după aceea : fragmentul rămas trebuie să fie pozitiv. Și cum masa unui electron este de atîtea ori mai mică decît cea a atomului cel mai ușor, putem conchide, cu certitudine, că cea mai mare parte din masa unui atom nu este reprezentată de electroni, ci de ansamblul particulelor elementare rămase, care sînt mult mai grele decît electronii. Vom denumi această parte mai grea a unui atom, *nucleul* lui.

Fizica modernă experimentală a creat metode de a sparge nucleul unui atom, de a transmuta atomii unui element în atomii altui element și de a extrage din nucleu particulele elementare grele din care este alcătuit. Acest capitol al fizicii, cunoscut sub numele de „fizică nucleară“,

la care a contribuit atît de mult Rutherford, este, din punctul de vedere experimental, cel mai interesant. Dar pînă la ora actuală lipsește încă o teorie simplă, din punctul de vedere al ideilor ei fundamentale, care să interpreteze marea varietate de fapte din domeniul fizicii nucleare. Și cum în aceste pagini ne interesează numai ideile fizice generale, vom trece peste acest capitol, în ciuda marii sale importanțe pentru fizica modernă.

§ 37. CUANTE DE LUMINĂ

Să considerăm un dig ridicat de-a lungul malului mării. Valurile îl lovesc necontenit, îl rod și se retrag lăsînd cîmp liber pentru alte valuri care înaintează. Masa digului descrește și vom putea spune ce parte din zid a fost roasă, de exemplu, într-un an. Să ne reprezentăm acum un proces diferit. Voim să micșorăm masa digului cu aceeași cantitate dar pe altă cale. Pentru aceasta tragem cu gloanțe asupra digului ; din locurile atinse se vor desprinde fragmente de zid. Masa digului va descrește și ne putem ușor imagina că ea a scăzut cu aceeași cantitate în ambele cazuri. Din aspectul digului, vom putea recunoaște ușor dacă masa lui a scăzut sub acțiunea continuă a valurilor sau sub cea discontinuă a ploii de gloanțe. Pentru înțelegerea fenomenelor pe care le descriem, este necesar să ne întipărim în minte diferența dintre acțiunea mării și cea a grindinii de proiectile.

Am spus mai sus că un fir încălzit emite electroni. Vom prezenta acum un alt mod de a extrage electroni dintr-un metal. Lumina omogenă, de exemplu lumina violetă, care după cum știm are o lungime de undă determinată, este lăsată să bombardeze o suprafață metalică. Lumina zmulge electroni din metal. Electronii se depărtează de metal și, ca o ploaie, se deplasează cu o viteză dată. Din punctul de vedere al principiului energiei, putem să spunem că energia luminii a fost transformată, parțial, în energia cinetică a electronilor expulzați. Tehnica experimentală modernă ne permite să înregistrăm aceste proiectile electronice, și să le determinăm viteza și deci energia. Această zmulgere a electronilor dintr-un

metal de către lumina care cade asupra lui se numește *efect fotoelectric.*

Am pornit de la acțiunea unei unde de lumină omogenă de anumită intensitate. Dar, ca în orice experiență, trebuie să schimbăm acum condițiile de lucru spre a stabili dacă aceasta are vreo influență asupra efectului observat.

Începem prin a varia intensitatea luminii omogene violete care cade asupra plăcii de metal pentru a stabili în ce măsură energia electronilor emiși depinde de intensitatea luminii incidente. Să încercăm să deducem rezultatul prin raționament, nu prin experiență. Am putea raționa astfel : în efectul fotoelectric o anumită fracțiune din energia radiației este transformată în energia de mișcare a electronilor. Dacă iluminăm metalul cu lumină de aceeași lungime de undă, provenită însă de la un izvor mai intens, atunci energia electronilor emiși ar trebui să fie mai mare deoarece radiația este mai bogată în energie. Ar trebui deci să ne așteptăm ca viteza electronilor emiși să crească pe măsură ce crește intensitatea luminii incidente. Dar experiența contrazice, și de data aceasta, prezicerea noastră. Constatăm încă o dată că legile naturii nu sînt așa cum le-am dori noi. Ne găsim din nou în prezența unei experiențe care contrazice prezicerile noastre, răsturnînd prin aceasta teoria din care au decurs. Rezultatul efectiv al experienței este, din punctul de vedere al teoriei ondulatorii, surprinzător : electronii observați au toți aceeași viteză ; energia lor nu variază cînd crește intensitatea luminii.

Acest rezultat experimental nu ar fi putut fi prezis de teoria ondulatorie. Și în cazul acesta răsare o nouă teorie din dezacordul dintre vechea teorie și experiență.

Să fim în mod intenționat nedrepți față de teoria ondulatorie a luminii trecînd sub tăcere marile ei succese : explicarea strălucită dată fenomenului de ocolire de către razele de lumină a obstacolelor foarte mici. Să ne concentrăm atenția asupra efectului fotoelectric și să-i cerem teoriei o explicație adecuată a acestui efect. Evident, nu putem deduce din teoria ondulatorie independența energiei electronilor de intensitatea luminii sub a cărei

acţiune fuseseră extraşi din placa de metal. Vom încerca o altă teorie. Ne amintim că teoria corpusculară a lui Newton, care explicase multe din fenomenele optice, nu a putut explica fenomenele observate în cazul difracţiei luminii, suferind un eşec. Să trecem acum peste el în mod intenţionat. În timpul lui Newton, noţiunea de energie nu exista. După el, corpusculele de lumină erau lipsite de greutate ; fiecărei culori îi corespundea altă specie de corpuscule, reprezentînd altă substanţă. Mai tîrziu, după ce a fost creat conceptul de energie şi s-a stabilit că lumina transportă energie, nimănui nu i-a trecut prin gînd să aplice acest concept teoriei corpusculare a luminii. Teoria lui Newton căzuse şi, pînă în secolul nostru, reînvierea ei nu părea să prezinte interes.

Pentru a menţine ideea principală a teoriei lui Newton trebuie să presupunem că lumina omogenă este compusă din grăunţe de energie, înlocuind deci corpusculele de lumină, primitive, prin mici porţiuni de energie, cuantele de lumină, care călătoresc în vid cu viteza luminii, şi pe care le vom numi *fotoni*. Reînvierea teoriei lui Newton, în această nouă formă, conduce la *teoria cuantică a luminii*. Nu numai materia şi sarcina electrică ci şi energia radiantă are o structură granulară adică este constituită din cuante de lumină. În concluzie, în afară de cuantele de materie şi cuantele de electricitate există şi cuante de energie.

Ideea cuantei de energie a fost introdusă de către Planck la începutul acestui secol, pentru a explica anumite fenomene mult mai complicate decît efectul fotoelectric. Dar efectul fotoelectric demonstrează mai limpede şi mai simplu necesitatea schimbării vechilor noastre concepţii.

Este evident, de la prima vedere, că această teorie cuantică a luminii explică efectul fotoelectric. O ploaie de fotoni cade pe o placă de metal ; acţiunea dintre radiaţie şi materie consistă, în cazul acesta, din foarte multe procese individuale de tipul : un foton izbeşte un atom şi-i zmulge un electron. Aceste procese individuale sînt toate identice şi electronul extras va avea aceeaşi energie în fiecare caz. Este clar, de asemenea, că în noul nostru

limbaj, a mări intensitatea luminii incidente înseamnă a mări numărul de fotoni care cad. Prin urmare, ceea ce ar urma să se schimbe este numărul de electroni expulzați din placa de metal, energia fiecăruia rămînînd însă aceeași. Se vede dar că această teorie e în perfectă concordanță cu observația.

Ce se va întîmpla dacă pe suprafața metalului ar cădea o rază de lumină omogenă de altă culoare decît cea violetă, să zicem o rază roșie ? Răspunsul la această întrebare să-l lăsăm în seama experienței. Pentru aceasta vom măsura energia electronilor extrași de lumina roșie comparînd-o apoi cu cea a electronilor zmulși de lumina violetă. Vom constata că energia electronilor extrași de lumina roșie este mai mică decît cea a electronilor extrași de lumina violetă. Cu alte cuvinte, energia cuantelor de lumină este diferită pentru culori diferite. Fotonii corespunzători culorii roșii au jumătate din energia celor care corespund culorii violete. Sau, mai general, energia unei cuante de lumină corespunzînd unei culori omogene descrește în proporția în care crește lungimea de undă. Există, așadar, o deosebire esențială între cuantele de energie și cuantele de electricitate : cuantele de lumină sînt diferite pentru fiecare lungime de undă, în vreme ce cuantele de electricitate sînt întotdeauna aceleași. Dacă am vrea să folosim una dintre analogiile noastre precedente ar trebui să comparăm cuantele de lumină cu subdiviziunile monetare cele mai mici, care diferă de la țară la țară.

Să facem, și mai departe, abstracție de teoria ondulatorie a luminii presupunînd că structura luminii este granulară și că ea este formată din cuante de lumină, adică din fotoni cari străbat spațiul cu viteza luminii. Astfel, în noua noastră imagine, lumina este o ploaie de fotoni, iar fotonul este cuanta elementară de energie luminoasă. Insă dacă am părăsit teoria ondulatorie, conceptul de lungime de undă și-a pierdut semnificația. Ce noțiune nouă urmează să-i ia locul ? Energia cuantei de lumină ! Cu această precizare orice aserțiune formulată în termenii teoriei ondulatorii poate fi transpusă într-o aserțiune a teoriei cuantice a radiației. De exemplu :

Terminologia teoriei ondulatorii	Terminologia teoriei cuantice
Lumina omogenă are o lungime de undă definită. Lungimea de undă a extremității roșii a spectrului este de două ori mai mare decît cea a extremității violete.	Lumina omogenă conține fotoni de energie definită. Energia fotonului din extremitatea roșie a spectrului este jumătate din cea corespunzătoare celei violete.

Situația poate fi rezumată după cum urmează : există fenomene care pot fi explicate de teoria cuantică, dar nu și de teoria ondulatorie ; un exemplu îl reprezintă efectul fotoelectric, dar se cunosc și alte fenomene de acest gen. Există fenomene care pot fi explicate de teoria ondulatorie, dar nu pot fi explicate de teoria cuantică, un exemplu tipic fiind ocolirea obstacolelor de către lumină. În sfîrșit, există fenomene, ca de pildă propagarea rectilinie a luminii, care pot fi explicate deopotrivă de bine atît de o teorie cît și de cealaltă.

Dar ce este lumina în realitate ? Este ea o undă sau o ploaie de fotoni ? Cîndva ne-am pus o întrebare asemănătoare, anume dacă lumina este o undă sau un roi de corpuscule luminoase. În stadiul acela aveam toate motivele să respingem teoria corpusculară a lumii și să acceptăm teoria ondulatorie care îmbrățișa toate fenomenele. Acum, însă, problema este mult mai complicată. Nu vedem cum s-ar putea face o descriere consecventă a tuturor fenomenelor optice adoptînd unul singur din cele două limbaje posibile. Face impresia că am fi nevoiți să ne folosim cînd de o teorie, cînd de cealaltă, iar uneori ar trebui să facem uz de amîndouă. Ne găsim în fața unei dificultăți de un tip nou. Avem două imagini contradictorii ale realității ; luate separat, nici una din ele nu poate explica integral fenomenele luminoase ; împreună, însă, da.

Cum s-ar putea oare combina aceste două imagini ? Cum am putea explica aceste două aspecte radical diferite ale luminii ? Nu este ușor să facem față acestei noi dificultăți. Ne găsim din nou în prezența unei probleme fundamentale.

Să acceptăm pentru moment teoria fotonică a luminii și să încercăm să înțelegem cu ajutorul ei fapte

explicate pînă acum de teoria ondulatorie. În felul acesta, vom sublinia dificultățile care fac, la prima vedere, ca cele două teorii să pară de neîmpăcat.

Ne amintim : un fascicul de lumină omogenă trecînd printr-un orificiu mic produce inele luminoase și întunecate (pag. 91). Cum am putea interpreta acest fenomen cu ajutorul teoriei cuantice a luminii, fără a face de loc apel la teoria ondulatorie ? Trimițînd un foton asupra unui orificiu, este de așteptat ca pe ecran să apară lumină dacă fotonul trece prin orificiu și întuneric dacă nu trece prin el. Totuși noi constatăm apariția unor inele alternativ luminoase și întunecate. Am putea încerca să explicăm aceasta astfel : există probabil o interacțiune între bordura orificiului și foton, care este cauza apariției inelelor de interferență. Bineînțeles, această propoziție nu poate fi privită ca o explicație. În cel mai bun caz, ea trasează un program pentru o explicație care să ne dea cel puțin speranța unei înțelegeri viitoare a difracției prin interacțiunea dintre materie și fotoni.

Dar chiar această vagă speranță ne este spulberată de analiza făcută înainte altui dispozitiv experimental. Să reluăm cazul celor două orificii fine. Lumina omogenă care trece prin ele produce pe ecran franje alternativ luminoase și întunecate. Cum poate fi interpretat acest efect din punctul de vedere al teoriei cuantice a luminii ? Am putea raționa astfel : un foton trece fie printr-un orificiu fie prin celălalt ; în orice caz, dacă un foton (de lumină omogenă) constituie o particulă elementară, nu vedem cum ar putea el să se dedubleze trecînd prin ambele orificii. Dar atunci fenomenul ar trebui să fie exact același ca în primul caz, adică inele luminoase și întunecate, nu franje luminoase și întunecate. Cum se explică atunci că prezența celuilalt orificiu poate schimba cu desăvîrșire aspectul fenomenului ? Căci, după toate aparențele, ceea ce transformă inelele în franje este orificiul prin care nu trece fotonul, chiar dacă acesta este situat la o distanță convenabilă de primul. Dar, dacă fotonul se comportă ca un corpuscul al fizicii clasice, el nu poate trece decît printr-un singur orificiu. În aceste condiții, fenomenul de difracție rămîne absolut de neînțeles.

Ştiința ne obligă să creăm noi idei, noi teorii. Scopul nostru este să dărîmăm zidul contrazicerilor care barează deseori drumul progresului științific. Toate ideile esențiale ale științei s-au născut în lupta dramatică dintre realitate și încercările noastre de a o înțelege. Avem de-a face, din nou cu o problemă pentru a cărei soluționare trebuie să facem apel la noi principii. Înainte de a înfățișa încercările fizicii moderne de a explica contrazicerile dintre aspectele cuantic și cel ondulatoriu ale luminii vom arăta însă că exact aceleași dificutăți apar de îndată ce avem de-a face cu cuantele de materie în locul celor de lumină.

§ 38. SPECTRE LUMINOASE

Ştim că toată materia este constituită, numai dintr-un număr restrîns de specii de particule. Primele particule elementare de materie descoperite au fost electronii ; ei sînt totodată și cuantele elementare de electricitate negativă. Am mai învățat că anumite fenomene ne obligă să admitem că lumina este compusă din cuante elementare de lumină, diferite pentru lungimi de undă diferite. Înainte de a trece mai departe trebuie să discutăm unele fenomene fizice în care joacă un rol esențial atît materia cît și radiația.

Soarele emite o radiaţie pe care o prismă o poate desface în componentele ei. Se obţine astfel spectrul continuu al Soarelui, adică spectrul în care sînt reprezentate toate lungimile de undă cuprinse între cele două extremităţi ale sale. Să luăm acum un alt exemplu. Am mai spus că sodiul incandescent emite lumină omogenă, lumină avînd o singură culoare, adică o singură lungime de undă. Dacă înaintea prismei se așază sodiul incandescent, atunci apare numai o linie galbenă.

În general, dacă înaintea unei prisme se așază un corp care radiază, atunci lumina pe care o emite el este descompusă în componentele sale, obţinîndu-se astfel spectrul caracteristic al corpului emițător.

Descărcarea electrică într-un tub care conține un

gaz este o sursă de lumină, aşa cum se observă în tuburile cu neon folosite pentru reclamele luminoase. Să aşezăm un tub din acestea înaintea unui spectroscop. Spectroscopul este un instrument care lucrează ca o prismă, dar cu mult mai multă precizie şi sensibilitate ; el desface lumina în componentele ei, adică o analizează. Lumina Soarelui, privită prin spectroscop, prezintă un spectru continuu ; în el apar toate lungimile de undă. Dacă izvorul luminos este un gaz prin care trece un curent electric, spectrul are un caracter diferit. În locul unei bande continue multicolore apar pe un fond întunecat linii luminoase distincte. Fiecare dungă, dacă este foarte îngustă, corespunde unei culori anumite sau, în limbajul teoriei ondulatorii, unei lungimi de undă anumite. De exemplu, dacă într-un spectru apar 20 de linii, fiecăreia din ele îi va corespunde unul din cele 20 de numere care vor desemna lungimile de undă. Vaporii diferitelor elemente au sisteme de linii diferite şi, prin urmare, diferite combinaţii de numere care corespund lungimilor de undă din spectrul emis. Nu există două elemente care să aibă acelaşi sistem de linii în spectrul lor caracteristic, după cum nu există două persoane care să aibă amprentele digitale absolut identice. După ce fizicienii au alcătuit un catalog al acestor linii, încetul cu încetul, a devenit evidentă existenţa unor legi, reuşindu-se chiar mai tîrziu, să se înlocuiască printr-o formulă matematică simplă coloanele de numere, în aparenţă fără legătură între ele, care exprimau lungimile de undă ale radiaţiilor emise de un corp dat.

Tot ce s-a spus pînă acum poate fi transpus în limbajul fotonic. Liniile corespund unor lungimi de undă definite, cu alte cuvinte unor fotoni cu energii definite. Prin urmare, gazele luminoase nu emit fotoni de toate energiile posibile ci numai pe cei caracteristici substanţei. Din nou realitatea limitează marele număr de posibilităţi.

Atomii unui element particular, să zicem ai hidrogenului, pot emite numai fotoni de energii diferite. Numai emisia anumitor cuante de energii definite este permisă, toate celelalte fiind interzise. Pentru simplicitate să ad-

mitem că un anumit element ar emite o singură linie, adică fotoni de energie riguros determinată. Orice atom este mai bogat în energie înainte de emisie și mai sărac după aceea sau, altfel exprimat, *nivelul lui de energie* este mai înalt înaintea emisiei și mai scăzut după aceea. Din principiul conservării energiei rezultă că diferența dintre cele două nivele trebuie să fie egală cu energia fotonilor emiși. Așadar, faptul că un atom al unui anumit element ar emite radiații de o singură lungime de undă, adică numai fotoni de energie perfect determinată, ar însemna că în acel atom sînt permise numai două nivele de energie, emiterea unui foton corespunzînd tranziției atomului de la nivelul mai înalt la cel mai scăzut.

Dar, de regulă, în spectrul unui element apar mai multe linii ; fotonii emiși corespund mai multor energii și nu uneia singure. Cu alte cuvinte, trebuie să admitem că în atomi sînt permise mai multe nivele energetice și că emisia unui foton corespunde tranziției unui atom de la unul din nivelele energetice mai înalte la unul din nivelele mai scăzute. Dar, esențialul este că nu orice nivel este permis, întrucît în spectrul unui element nu apare orice lungime de undă, adică fotoni de orice energie. În loc să spunem că spectrul unui atom este caracterizat prin anumite linii, prin anumite lungimi de undă definite, putem spune că fiecare atom are anumite nivele de energie definite și că emisia unei cuante de lumină este asociată cu tranziția atomului de la unul din aceste nivele energetice la altul. Nivelele de energie nu sînt, de regulă, continue, ci discontinue. Vedem iar că posibilitățile sînt restrînse de către realitate.

Primul care a explicat de ce apar în spectru anumite linii și nu altele a fost Bohr. Teoria lui, formulată cu 25 de ani în urmă, formează o imagine a atomului care, cel puțin în cazuri simple, permite prezicerea prin calcul a spectrelor elementelor. În cadrul acestei teorii, numere în aparență disparate și lipsite de semnificație sînt transformate într-un sistem coerent.

Teoria lui Bohr constituie o etapă intermediară către o teorie mai profundă și mai generală, numită mecanica ondulatorie sau cuantică. În paginile ce ne-au mai rămas

ne propunem să caracterizăm ideile pricipale ale acestei teorii. Înainte de a începe, trebuie să mai amintim un rezultat teoretic și experimental cu un caracter mai particular.

Spectrul nostru vizibil se întinde de la o anumită lungime de undă, cea corespunzătoare culorii violete, pînă la cea a culorii roșii. Cu alte cuvinte, energiile fotonilor din spectrul vizibil sînt, întodeauna, cuprinse între cele ale fotonilor din lumina violetă și roșie. Această limitare este determinată, fără îndoială, numai de proprietățile ochiului omenesc. Dacă diferența energiilor a două nivele este însă destul de mare, atunci se emite un foton *ultraviolet*, căruia îi corespunde o linie în afara spectrului vizibil. Apariția ei nu poate fi constatată numai cu ochiul ; pentru aceasta, este nevoie de o placă fotografică.

Razele X sînt compuse tot din fotoni, însă au o energie mult mai mare decît a celor din spectrul vizibil, adică lungimile lor de undă sînt mult mai mici, de mii de ori mai mici, decît cele ale luminii vizibile.

Dar este posibilă determinarea experimentală a unor lungimi de undă atît de mici ? Abia am reușit să le măsurăm pe ale luminii obișnuite ; am avut nevoie pentru aceasta de obstacole sau de deschideri mici. Dar două găuri, suficient de fine și de apropiate pentru a produce difracția luminii obișnuite, ar trebui să fie de multe mii de ori mai mici și mai apropiate una de alta pentru a produce difracția razelor X.

Cum putem, dar, măsura lungimea de undă a acestor raze ? Natura însăși ne vine în ajutor.

Un cristal este o îngrămădire de atomi așezați la distanțe foarte mici unul de altul, cu regularitate desăvîrșită (fig. 72). Figura noastră înfățișează un model simplu de structură a unui cristal. În locul unor deschideri minuscule avem obstacole extrem de mici, constituite din atomii elementului, așezați foarte aproape unul de altul, într-o ordine absolut regulată. După cum rezultă din teoria structurii cristalelor, distanțele dintre atomi sînt de ajuns de mici pentru a ne putea aștepta ca ele să dea fenomenul de difracție pentru razele X. Experiența dovedește că, în adevăr, este posibil să producem

difracția razelor X cu ajutorul acestor obstacole așa de înghesuite, așezate într-o distribuție tridimensională regulată, caracteristică.

Să presupunem că un fascicul de raze X străbate un cristal și cade apoi pe o placă fotografică ; pe placă se înregistrează, atunci, o figură de difracție. S-au folosit diferite metode pentru studierea spectrelor razelor X și pentru determinarea lungimii lor de undă din figura de difracție. Ce s-a spus aici în cîteva cuvinte ar umple tomuri întregi dacă am indica toate amănuntele teoretice și experimentale. În planșa III reproducem o singură figură de difracție, obținută prin una din metodele existente. Regăsim inelele luminoase și întunecate atît de caracteristice pentru fenomenele ondulatorii. În centru se poate vedea raza nedifractată. Dacă între razele X și placa fotografică nu s-ar fi interpus un cristal ar fi apărut numai punctul luminos din centru. Fotografii de felul acesta permit calcularea lungimelor de undă corespunzătoare spectrelor razelor X ; de altă parte, cunoscînd lungimea de undă a razelor X se pot trage concluzii cu privire la structura cristalului.

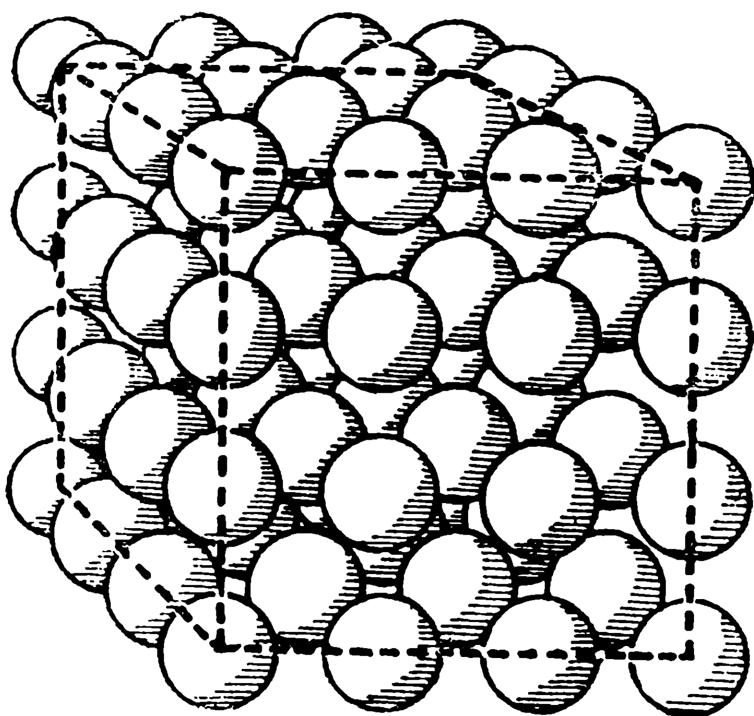


Fig. 72

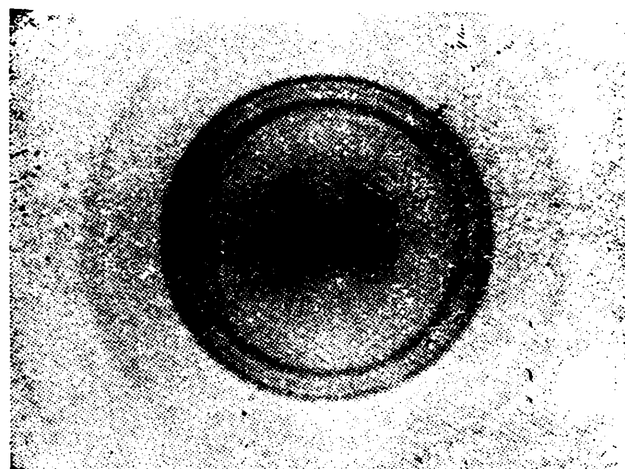
§ 39. UNDE DE MATERIE

Cum trebuie să interpretăm faptul că în spectrele elementelor apar numai anumite lungimi de undă caracteristice ?

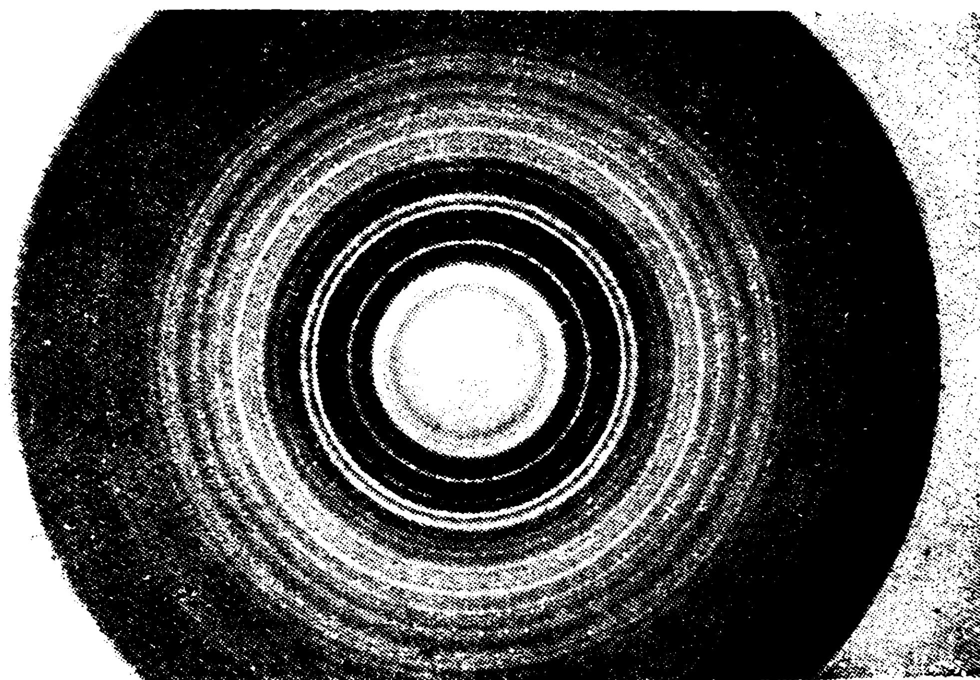
Deseori s-a întîmplat ca, în fizică, să fie realizat un



(Fotografiate de A. G. Shenstone)
Linii spectrale.



(Fotografiată de Lastowiecki şi Gregor)
Difracţia razelor X.



(Fotografiată de Loria şi Klinger)
Difracţia undelor electronice.

progres esențial exploatîndu-se o analogie consecventă între fenomene în aparență fără legătură. În aceste pagini am văzut deseori cum idei create și dezvoltate într-o ramură a științei au fost apoi aplicate, cu succes, în altă ramură. Dezvoltarea concepțiilor mecanice și de cîmp oferă multe exemple de felul acesta. Asocierea unor probleme rezolvate cu altele nerezolvate poate arunca o lumină nouă asupra dificultăților ce le întîmpinăm, sugerîndu-ne idei noi. Analogii superficiale care, în fond,

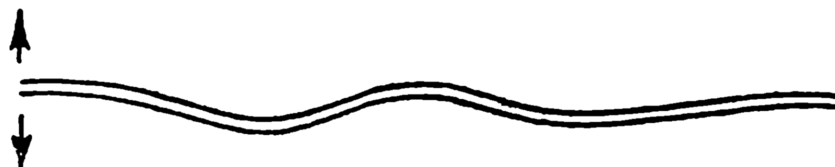


Fig. 73.

nu exprimă nimic, nu sînt greu de stabilit. Dar a descoperi trăsături comune, esențiale, ascunse de diferențe exterioare, a construi pe această bază o nouă teorie fructuoasă, este o realizare importantă. Dezvoltarea așa-numitei mecanici ondulatorii, ale cărei baze le-au pus de Broglie și Schrödinger în urmă cu mai puțin de 15 ani, este un exemplu tipic de creare a unei teorii fecunde pe baza unei analogii adînci și fericite.

Drept punct de plecare al expunerii ne va sluji un exemplu clasic care nu are nimic de-a face cu fizica modernă. Să apucăm capătul unui tub de cauciuc foarte lung și subțire sau al unui resort foarte lung și să-l agităm ritmic în sus și în jos, imprimîndu-i astfel o mișcare oscilatorie. Atunci, cum am văzut în mai multe exemple, datorită oscilației, ia naștere o undă care se propagă în lungul tubului cu o anumită viteză. Dacă am dispune de un tub infinit de lung atunci unda, odată produsă, și-ar continua nestingherită călătoria ei fără de sfîrșit (fig. 73).

Acum să luăm un alt exemplu ; să fixăm cele două capete ale tubului de mai sus, ori, dacă preferați, ale unei coarde de vioară (fig. 74). Ce se întîmplă acum cu o undă care ia naștere la unul din capetele tubului de cauciuc sau al coardei ? Unda își începe călătoria ca în exemplul precedent, dar este curînd reflectată de celălalt capăt al

tubului. Avem acum două unde: una produsă prin oscilație, cealaltă prin reflexie; ele înaintează în direcții opuse și interferează. Nu va fi prea greu să studiem interferența celor două unde determinînd unda unică ce rezultă din suprapunerea lor; ea se numește *„undă staționară"*. Cei doi termeni „staționar" și „undă" par a se exclude. Vom vedea totuși numaidecît că asocierea lor este justificată de rezultatul suprapunerii a două unde.

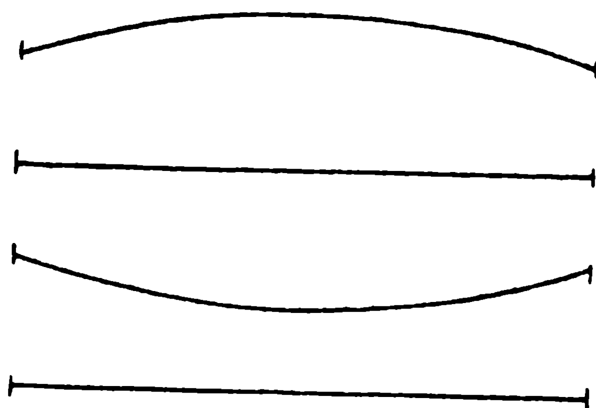


Fig. 74

Cel mai simplu exemplu de undă staționară este mișcarea unei coarde fixate la capete, care, cum se vede din fig. 74 este o mișcare alternativă în sus și în jos. Această mișcare este rezultatul suprapunerii a două unde care înaintează în direcții opuse. Caracteristica acestei mișcări este că numai cele două puncte de la extremitățile ei sînt în repaus. Ele se numesc *noduri*. Este ca și cum unda ar fi suspendată între cele două noduri, căci toate punctele coardei ating simultan atît maximurile cît și minimurile deviației lor.

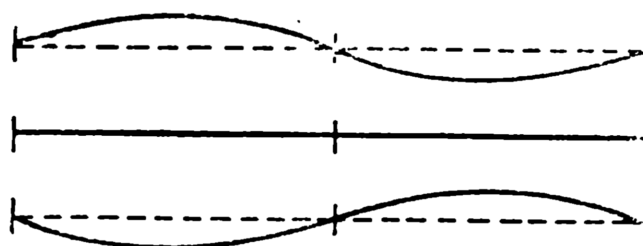


Fig. 75

Am descris doar tipul cel mai simplu de undă staționară. Există însă și altele; de exemplu o undă staționară poate avea trei noduri, cîte unul la cele două capete și unul la mijloc. În acest caz, trei puncte sînt permanent în repaus. Aruncînd o privire asupra fig. 75 vedem că acum lungimea de undă este jumătate din cea a undei cu două noduri. O undă staționară poate avea patru



Fig. 76

(fig. 76), cinci şi chiar mai multe noduri ; în fiecare caz, lungimea de undă depinde de numărul de noduri. Acest număr poate fi numai întreg şi poate varia numai în salturi. Afirmaţia : „numărul de noduri într-o undă staţionară este de 3,576" este pur şi simplu absurdă. Aşadar, lungimea de undă poate varia numai discontinuu. În această problemă ultraclasică regăsim un aspect familiar nouă din teoria cuantelor. În realitate, unda staţionară produsă, de exemplu, de un violonist este mult mai complicată, ea fiind un amestec de foarte multe unde cu 2, 3, 4 şi mai multe noduri, cu lungimi de undă diferite. Fizica este în măsură să descompună un asemenea amestec în undele staţionare simple din care este compus. Folosind terminologia noastră de mai sus, am putea spune că o coardă care oscilează are spectrul ei întocmai ca un element care emite o radiaţie şi că, întocmai ca în cazul spectrului unui element, numai anumite lungimi de undă sînt permise, toate celelalte fiind interzise.

Am stabilit astfel o asemănare între coarda care oscilează şi atomul care emite o radiaţie. Să tragem acum concluziile care decurg din această analogie, oricît de ciudată s-ar părea ea, încercînd să o ducem pînă la capăt, o dată ce am acceptat-o. Atomii fiecărui element sînt compuşi din particule elementare, cea mai grea constituind nucleul, cele mai uşoare, electronii. Un asemenea sistem de particule se comportă ca un mic instrument acustic în care se produc unde staţionare.

Dar o undă staţionară este rezultatul interferenţei a două şi, în general, chiar a mai multor unde progresive. Prin urmare, dacă analogia noastră are un sîmbure de adevăr, unei unde progresive trebuie să-i corespundă un sistem mai simplu decît atomul. Care este însă cel mai simplu sistem ? În lumea noastră materială nimic nu poate fi mai simplu decît un electron, o particulă elementară, asupra căreia nu acţionează nici o forţă, adică un electron în repaus sau în mişcare uniformă. Acum veriga următoare în lanţul analogiei noastre rezultă imediat :

electron în mişcare uniformă → unde de lungime de undă anumită.

Aceasta a fost ideea nouă și îndrăzneață a lui de Broglie.

Am arătat mai înainte că există fenomene în care lumina manifestă un caracter ondulatoriu și altele în care manifestă un caracter corpuscular. După ce ajunsesem să considerăm, mai presus de îndoială, că lumina este o undă, am constatat, spre nedumerirea noastră, că, în unele cazuri, de exemplu în cazul efectului fotoelectric, ea se comportă ca o ploaie de fotoni. Pentru electroni situația este exact contrarie. Ne-am deprins cu ideea că electronii sînt particule, cuante elementare de electricitate și materie. Mai mult, le-am determinat sarcina și masa. Ei bine, dacă ideea lui de Broglie conține o parte de adevăr atunci trebuie să existe fenomene în care materia să-și dea la iveală caracterul ei ondulatoriu. La prima vedere, această concluzie, dedusă din analogia acustică, pare bizară și de neînțeles. Ce poate avea de-a face un corpuscul în mișcare cu o undă ? Dar, aceasta nu ar fi prima dificultate de felul acesta pe care o întîmpinăm în fizică. Am întîlnit aceeași problemă în domeniul fenomenelor optice.

Rolul esențial în elaborarea unei teorii fizice îl joacă ideile fundamentale. Tratatele de fizică sînt pline de formule matematice complicate. Dar punctul de plecare al oricărei teorii fizice îl constituie ideile, nu formulele. Ulterior, ideile trebuie să îmbrace forma matematică a unei teorii cantitative pentru a permite confruntarea cu experiența. Situația aceasta poate fi ilustrată chiar de exemplul problemei cu care ne ocupăm acum. Presupunerea principală a teoriei în discuție este că electronul în mișcare uniformă se va comporta, în anumite fenomene, ca o undă. Să presupunem că un electron sau o ploaie de electroni, toți avînd aceeași viteză, se mișcă uniform. Masa, sarcina și viteza fiecărui electron individual sînt cunoscute. Dacă ne-am propus să asociem într-un fel oarecare conceptul de undă cu mișcarea uniformă a unui electron sau a unor electroni, prima noastră întrebare trebuie să fie : care este lungimea de undă corespunzătoare electronului ? Aceasta este o întrebare cantitativă și, pentru a-i da un răspuns, trebuie construită o teorie mai mult

sau mai puţin cantitativă. Ei bine, sarcina aceasta s-a dovedit foarte simplă : simplicitatea matematică a lucrării lui de Broglie, în care se lămureşte această chestiune, este pur şi simplu uimitoare. În perioada cînd elabora această teorie, tehnica matematică a altor teorii fizice era, comparativ, foarte subtilă şi complicată. Aparatul matematic folosit în teoria undelor de materie este extrem de simplu şi elementar, dar ideile ei fundamentale sînt adînci şi bogate în consecinţe.

Am arătat mai înainte, în cazul undelor de lumină şi al fotonilor, că orice afirmaţie formulată în limbajul ondulatoriu poate fi tradusă în limbajul fotonilor, adică al corpusculelor de lumină. Acest lucru este valabil şi pentru undele electronice. Pentru electronii în mişcare uniformă, se cunoaşte limbajul corpuscular. Dar orice afirmaţie formulată în limbajul corpuscular trebuie să poată fi tradusă în limbajul ondulatoriu, întocmai ca în cazul fotonilor. Regulile de traducere ne-au fost date de două fire conducătoare. Primul este analogia dintre undele de lumină şi undele electronice, adică dintre fotoni şi electroni, care ne va permite să folosim, în cazul materiei, aceeaşi metodă de traducere ca pentru lumină. Al doilea fir conducător derivă din teoria relativităţii restrînse. Legile naturii trebuie să fie invariante faţă de transformarea Lorentz, nu faţă de transformarea clasică. Aceste două fire conducătoare determină, împreună, lungimea de undă care corespunde unui electron în mişcare. Pentru un electron care se deplasează, de exemplu, cu o viteză de 16 000 km/s, rezultă din teorie o lungime de undă — uşor calculabilă — care cade în domeniul lungimilor de undă ale razelor X. Prin urmare, dacă caracterul ondulatoriu al materiei poate fi pus în evidenţă, atunci demonstrarea lui experimentală trebuie făcută ca şi pentru razele X.

Să ne imaginăm un fascicul de electroni care se deplasează uniform, cu o viteză dată sau, în terminologia ondulatorie, o undă electronică omogenă şi să presupunem că ea cade pe un cristal foarte subţire care joacă rolul unei reţele de difracţie. Să admitem că distanţele dintre obstacolele pe care le reprezintă particulele cris-

talului sînt de ajuns de mici pentru a se produce difracția razelor X. În cazul acesta, ne putem aștepta la un efect similar pentru undele electronice de lungime de undă de același ordin de mărime. O placă fotografică ar trebui să înregistreze difracția unor asemenea unde electronice care au străbătut pătura subțire de cristal. Experiențele confirmă efectiv, în mod neîndoielnic, fenomenul difracției undelor electronice, ceea ce constituie unul din cele mai mari succese ale teoriei. Asemănarea dintre difracția unei unde electronice și cea a unor raze X este deosebit de evidentă, cum rezultă din compararea figurilor de difracție din planșa a treia. Știm că o asemenea fotografie ne permite să determinăm lungimea de undă a razelor X. Aceeași metodă este valabilă și pentru undele electronice. Figura de difracție ne dă lungimea undei de materie și concordanța cantitativă perfectă dintre teorie și experiență confirmă, în mod strălucit, raționamentul nostru.

Acest rezultat are însă drept efect lărgirea și adîncirea dificultăților noastre, ceea ce se poate ilustra limpede printr-un exemplu asemănător cu cel dat pentru o undă de lumină. Un fascicul de electroni proiectat pe o deschidere foarte mică se va difracta întocmai ca o undă de lumină pe placa fotografică. Vor apărea inele luminoase și întunecate. Să admitem că ar exista speranța de a explica acest fenomen prin interacțiunea dintre electroni și bordura orificiului, deși această explicație nu prea pare posibilă. Cum rămîne însă atunci cu cazul a două deschideri, unde în loc de inele apar franje ? Cum este posibil ca prezența unui al doilea orificiu să schimbe cu desăvîrșire fenomenul ? Electronul este indivizibil și evident nu poate să treacă decît printr-unul singur din cele două orificii. De unde ar putea să ghicească un electron care trece printr-una din deschideri că puțin mai încolo există o a doua deschidere ?

Mai înainte ne întrebasem : ce este lumina ? Este o ploaie de corpuscule sau o undă ? Acum este cazul să întrebăm : Ce este materia ? Ce este un electron ? El este o particulă sau o undă ? Cînd trece printr-un cîmp electric sau magnetic exterior, electronul se comportă ca o particulă. Cînd este difractat de un cristal, se comportă

ca o undă. Vedem deci că în cazul cuantelor elementare de materie întîmpinăm aceeaşi dificultate ca în cazul cuantelor de lumină. Una dintre chestiunile fundamentale ridicate de progresul recent al ştiinţei este cum să împăcăm aceste două aspecte contradictorii : cel de materie şi cel de undă. Aceasta este una dintre acele dificultăţi fundamentale care o dată formulate, în cele din urmă, trebuie să determine un progres ştiinţific. Fizica a încercat să soluţioneze această problemă. Viitorul singur va decide dacă soluţia sugerată de fizica modernă este provizorie sau de durată.

§ 40. UNDE DE PROBABILITATE

Potrivit mecanicii clasice, dacă noi cunoaştem poziţia şi viteza unui punct material, la un moment dat, precum şi forţele exterioare ce acţionează asupra lui, se poate prezice, din legile mecanicii, întreaga lui traiectorie ulterioară. Afirmaţia : „În cutare moment punctul material are cutare viteză şi poziţie" are o semnificaţie bine precizată în mecanica clasică. Dacă această afirmaţie şi-ar pierde conţinutul, atunci, raţionamentul nostru (pag. 29) privitor la precizarea traiectoriei ar cădea.

Pe la începutul secolului al XIX-lea, fizicienii încercaseră să reducă toată fizica la acţiunea unor forţe simple asupra unor particule materiale, avînd poziţii şi viteze determinate în fiecare moment. Să ne amintim cum am descris mişcarea cînd am analizat mecanica la începutul călătoriei noastre prin domeniul problemelor fizice : În lungul unui drum bine definit am figurat mai întîi puncte care indicau poziţia exactă a corpului la un moment dat, şi apoi vectori tangenţi care indicau orientarea şi valoarea vitezelor. Acestea sînt simple şi convingătoare. Totuşi nu le putem repeta în cazul cuantelor elementare de materie, adică al electronilor sau al cuantelor de energie — adică al fotonilor. Deplasarea unui foton sau electron nu o putem reprezenta grafic în felul în care am reprezentat mişcarea în mecanica clasică. Exemplul celor două orificii demonstrează limpede a-

ceasta : electronul și fotonul par a trece prin amîndouă deschiderile. Prin urmare, este imposibil să descriem traiectoria unui electron sau a unui foton în modul vechi, clasic.

Firește, trebuie să presupunem existența unor procese elementare, ca de pildă trecerea electronilor sau fotonilor prin orificiu. Existența cuantelor elementare de materie și energie nu poate fi pusă la îndoială, dar legile elementare nu pot fi formulate precizînd pozițiile și vitezele din fiecare moment în modul simplu al mecanicii clasice.

Să încercăm deci altă soluție. Să repetăm de un număr foarte mare de ori același proces elementar. Să trimitem, unul după altul, electronii în direcția orificiilor, Cuvîntul „electron" este folosit aici pentru fixarea ideilor ; raționamentul este valabil și pentru fotoni.

Repetăm, deci, experiența noastră de foarte multe ori, în mod perfect identic : electronii se îndreaptă cu aceeași viteză în direcția celor două deschideri. Aproape nu trebuie să amintim că aceasta este o experiență idealizată care nu poate fi efectuată în realitate, dar care poate fi foarte bine imaginată : nu putem proiecta electroni sau fotoni izolați cum ies gloanțele din țeava unei puști.

Rezultatul acestei experiențe trebuie să fie bine cunoscutele inele întunecate și luminoase, cînd avem o singură deschidere, și dungi întunecate și luminoase, cînd avem două deschideri. Dar cazul acesta se deosebește fundamental de cel al unui singur electron. Raționînd asupra electronului individual, rezultatul experimetal este de neînțeles. În cazul repetării experienței, interpretarea devine însă mai simplă : franjele luminoase apar acolo unde cad mulți electroni, cele mai puțin luminoase unde cad mai puțini electroni, iar un punct întunecat de tot, unde nu cad de loc electroni. Bineînțeles, nu avem dreptul să presupunem că toți electronii trec prin aceeași gaură. Dacă ar fi așa, ar fi absolut indiferent dacă cealaltă gaură este sau nu obturată. Dar știm că, acoperind cealaltă gaură, fenomenul se schimbă. Întrucît o particulă este indivizibilă, nu putem admite că ea trece prin amîn-

două orificiile. Dar faptul că experiența a fost repetată de multe ori sugerează o altă interpretare : probabil că unii din electroni trec prin prima deschidere, ceilalți prin cea de a doua. Nu știm de ce un electron anumit ar alege o deschidere anumită, dar rezultatul repetării experienței trebuie să fie participarea ambelor orificii la transmiterea electronilor de la izvor la ecran. Dacă ne mărginim să deducem ce se întîmplă cu mulțimea de electroni la repetarea experienței fără a ne preocupa de comportarea particulelor individuale, atunci diferența dintre cazul cînd se formează inele și cel cînd se formează franje devine inteligibilă. Din discutarea unui șir de experiențe a luat naștere o nouă idee, cea a ansamblului de particule în care fiecare particulă, luată în parte, se compoartă într-un mod imprevizibil. Traiectoria unui electron izolat nu o putem prevedea ; putem, totuși, prezice că, în cele din urmă, se vor obține dungi luminoase și întunecate pe ecran.

Să părăsim pentru scurt timp fizica cuantică.

În fizica clasică am văzut că, dacă știm poziția și viteza unui punct material la un moment dat precum și forțele care acționează asupra lui, putem să prezicem traiectoria lui ulterioară. Am văzut, de asemenea, cum punctul de vedere mecanicist se aplică în teoria cinetică a materiei. Dar, din considerațiile făcute în cadrul acestei teorii, s-a născut o idee nouă. Pentru înțelegerea celor ce urmează ne va fi util să sezisăm perfect această idee.

Să presupunem că avem un vas care conține un gaz. Dacă ne-am propune să precizăm mișcarea tuturor particulelor sale ar trebui să determinăm mai întîi stările lor inițiale, adică pozițiile și vitezele inițiale ale tuturor particulelor. Chiar dacă acest lucru ar fi posibil, nu ne-ar ajunge o viață de om pentru a însemna rezultatul pe hîrtie, atît este de mare numărul particulelor care ar trebui catalogate. Dacă am încerca, în problema aceasta, să ne servim de metodele cunoscute ale mecanicii clasice pentru a calcula pozițiile finale ale particulelor, dificultățile ar fi de neînvins. În principiu, ar fi posibil să folosim metoda aplicată, de exemplu, mișcării planetelor, în practică ea este însă neîntrebuințabilă și trebuie să cedeze locul *me-*

todei statistice. Această metodă ne dispensează de a cunoaște exact starea inițială. Știind mai puțin despre sistem la un moment dat, vom fi mai puțin în stare să afirmăm ceva despre trecutul sau viitorul lui. Destinul unei particule individuale a gazului devine indiferent ; problema noastră este de altă natură. Nu întrebăm de exemplu. „care este viteza fiecărei particule în acest moment ?" Ci : „Cîte particule au o viteză cuprinsă între 300 și 400 metri pe secundă ?" Nu ne preocupăm de indivizi. Ceea ce căutăm să determinăm sînt valorile medii care caracterizează întregul ansamblu. Este limpede că metoda statistică de raționament are un sens numai dacă sistemul constă dintr-un număr mare de indivizi.

Aplicînd metoda statistică nu putem prevedea comportarea unui individ dintr-o mulțime. Putem, totuși, prezice șansa, *probabilitatea* ca el să se comporte într-un anumit mod. Dacă legile noastre statistice ne spun de exemplu că o treime din particule au o viteză cuprinsă între 300 și 400 metri pe secundă, aceasta înseamnă că, repetînd observațiile noastre asupra unui număr mare de particule, vom obtine efectiv această medie sau, altfel exprimat, că probabilitatea de a găsi o particulă cu viteza cuprinsă în aceste limite este de 1/3.

Asemănător, a cunoaște media natalității unei mari comunități de oameni nu înseamnă a ști dacă cutare familie are sau nu un copil. Aceasta înseamnă a cunoaște un rezultat statistic în care indivizii nu joacă nici un rol.

Înregistrînd numerele de circulație ale multor automobile vom stabili în scurt timp că o treime din aceste numere sînt divizibile prin 3. Aceasta nu ne dă însă posibilitatea de a prevedea dacă numărul automobilului care trece în clipa de față are această însușire : legile statistice pot fi aplicate numai unor colective mari, dar nu și membrilor individuali.

Să revenim acum la problema noastră cuantică.

Legile fizicii cuantice au un caracter statistic. Aceasta înseamnă că ele nu se referă la un sistem izolat ci la un ansamblu de sisteme identice. Ele nu pot fi verificate prin măsurări asupra unui individ, ci numai printr-o serie de măsurări repetate.

Dezintegrarea radioactivă, accesibilă observațiilor noastre, constă din numeroase evenimente de același tip. Fizica cuantică încearcă să formuleze legile care guvernează această transmutare spontană a unui element în altul. Știind, de exemplu, că în interval de 1 600 de ani, jumătate dintr-un gram de radiu se va dezintegra și jumătate va rămîne, putem prevedea aproximativ cîți atomi se vor dezintegra într-o jumătate de oră. Totuși, chiar într-o expunere teoretică nu putem preciza de ce tocmai cutăror atomi li s-a împlinit sorocul. Cunoștințele noastre actuale nu ne permit să desemnăm atomii individuali condamnați să se dezintegreze. Soarta unui atom nu depinde de vîrsta lui. Nu cunoaștem cîtuși de puțin legea care guvernează comportarea lor individuală. Se pot formula numai legi statistice, legi care guvernează ansambluri mari de atomi.

Să luăm un alt exemplu. Lumina emisă de un gaz, privită printr-un spectroscop, prezintă linii de anumite lungimi de undă. Apariția unui grup de anumite lungimi de undă este caracteristică pentru acele fenomene atomice, în care este pusă în evidență existența cuantelor elementare. Dar problema aceasta are și un alt aspect. Unele din liniile spectrale sînt foarte accentuate, altele sînt mai slabe. O linie accentuată indică emiterea unui număr relativ mare, o linie slabă (fluă) a unui număr relativ mic de fotoni aparținînd lungimii de undă corespunzătoare. Teoria face și în cazul acesta, numai afirmații de natură statistică. Fiecare linie corespunde unei tranziții de la un nivel energetic mai înalt la unul mai jos. Teoria ne indică numai probabilitatea fiecărei tranziții posibile dar nu ne spune nimic despre tranziția efectivă a atomului individual. Teoria se verifică strălucit deoarece toate aceste fenomene sînt determinate de mulțimi mari și nu de indivizi izolați.

S-ar părea că noua fizică cuantică se aseamănă întrucîtva cu teoria cinetică a materiei, de vreme ce amîndouă sînt de natură statistică și amîndouă se referă la un număr mare de particule. Dar aceasta nu corespunde realității. Este foarte important să înțelegem și diferențele, nu numai asemănările acestei analogii. Asemănarea dintre teoria cinetică a materiei și fizica cuantică consistă,

mai cu seamă, în caracterul lor statistic. Care sînt însă diferențele dintre ele?

Dacă vrem să știm cîți bărbați și cîte femei trecuți de 20 de ani trăiesc într-un oraș, trebuie să-i cerem fiecărui cetățean să completeze un formular care să conțină rubricile : sex masculin, sex feminin și vîrsta. Admițînd că toate răspunsurile sînt corecte, numărîndu-le după clasarea lor, vom stabili un rezultat de natură statistică. Numele și adresa fiecărui individ în parte nu contează, deși informația noastră statistică a fost dobîndită trecînd în revistă cazurile individuale. În mod asemănător, în teoria cinetică a materiei legile statistice care guvernează ansamblul sînt dobîndite pe baza unor legi individuale.

Dar în fizica cuantică situația este cu totul alta. Aici legile statistice sînt *date direct*. Legile individuale nu sînt luate în considerare. În exemplul cu fotonul sau electronul și cele două deschideri am văzut că nu putem preciza mișcarea posibilă în spațiu și în timp a unei particule elementare, cum făcusem în fizica clasică. Fizica cuantică abandonează legile individuale ale particulelor elementare și enunță *direct* legile statistice care guvernează ansamblurile. Este imposibil să precizăm, pe baza fizicii cuantice, pozițiile și vitezele unei particule elementare sau să-i prezicem traiectoria, ca în fizica clasică. Fizica cuantică are de a face numai cu ansambluri și legile ei sînt pentru mulțimi și nu pentru indivizi.

Necesitatea necruțătoare și nu speculația sau dorința de mai nou ne constrîng să ne schimbăm concepția noastră clasică. Dificultățile aplicării concepției vechi au fost schițate numai pentru un singur exemplu, cel al fenomenelor de difracție. Am putea însă cita multe altele, la fel de elocvente. Schimbările de concepție ne sînt impuse necontenit de încercările noastre de a înțelege realitatea. Dar de fiecare dată viitorul își rezervă dreptul de a hotărî dacă am găsit singura soluție posibilă sau dacă există o modalitate mai bună de a înlătura dificultățile.

Am fost deci nevoiți să părăsim descrierea cazurilor individuale, ca evenimente obiective în spațiu și timp, înlocuind-o cu legi de natură statistică. Aceasta este esența fizicii cuantice moderne.

Pînă acum, ori de cîte ori am introdus o realitate fizică nouă, de pildă cîmpul electromagnetic, cîmpul gravitațional, am încercat să indicăm, într-o formă generală, caracteristicile ecuațiilor prin care erau formulate matematic ideile respective. Vom face același lucru cu fizica cuantică, referindu-ne numai foarte pe scurt la lucrările lui Bohr, de Broglie, Schrődinger, Heisenberg, Dirac și Born.

Să considerăm cazul unui electron. El poate fi supus acțiunii unui cîmp electromagnetic exterior oarecare, sau poate fi liber de orice acțiune exterioară. Fie că se mișcă, de exemplu, în cîmpul unui nucleu atomic, fie că se difractă pe un cristal, fizica cuantică ne învață să formulăm ecuațiile matematice corespunzătoare.

Am stabilit că există o asemănare între o coardă vibrantă, membrana unei tobe, un instrument de suflat sau oricare alt instrument acustic, pe de o parte, și un atom care radiază, pe de altă parte. Asemănarea aceasta există și între ecuațiile matematice care guvernează problemele acustice și cele care guvernează problemele fizicii cuantice. Dar, interpretarea fizică a mărimilor care intervin în cele două cazuri este cu totul diferită. Mărimile fizice care descriu coarda vibrantă și atomul care radiază au un caracter cu totul diferit, în ciuda asemănării formale a acestor ecuații. În cazul coardei vibrante ne întrebăm care este deplasarea din poziția normală a unui punct arbitrar, la un moment oarecare. Pentru a răspunde, este de ajuns să cunoaștem forma coardei într-un singur moment al vibrației ei, deoarece, în cazul acesta, din ecuațiile matematice ale coardei vibrante rezultă deplasarea ei din poziția normală în orice alt moment. Faptul că, la un moment dat, fiecărui punct al coardei îi corespunde o deplasare anumită din poziția normală este exprimat mai riguros astfel : pentru fiecare moment, deplasarea de la valoarea normală este o *funcțiune* de coordonatele coardei. Toate punctele coardei formează un continuum unidimensional ; deplasarea este o funcțiune definită în acest continuum unidimensional deoarece ea poate fi calculată din ecuațiile coardei vibrante.

În mod analog, în cazul unui electron avem o anu-

mită funcțiune pentru fiecare punct al spațiului și pentru fiecare moment. Vom numi această funcție *undă de probabilitate*. În analogia noastră, unda de probabilitate corespunde abaterii de la poziția normală din problema acustică. Unda de probabilitate este, în fiecare moment, o funcțiune definită pe un continuum tridimensional, în vreme ce în cazul corzii deplasarea era, în fiecare moment, o funcțiune definită pe un continuum unidimensional. Unda de probabilitate constituie un catalog al cunoștințelor noastre asupra sistemului cuantic studiat și ne permite să răspundem la toate problemele, evident, statistice referitoare la acest sistem. Ea nu ne indică, de exemplu, poziția sau viteza electronului în fiecare moment, deoarece o asemenea problemă nu are sens în fizica cuantică. In schimb ea ne indică probabilitatea de a întîlni un electron într-un punct anumit sau ne spune unde avem cea mai mare șansă de a-l întîlni. Rezultatul nu se referă la o măsurare ci la un număr mare de măsurări. Cu alte cuvinte, ecuațiile fizicii cuantice determină unda de probabilitate, după cum ecuațiile lui Maxwell determină cîmpul electromagnetic și ecuațiile gravitaționale determină cîmpul gravitațional. Legile fizicii cuantice sînt tot legi de structură. Dar semnificația conceptelor fizice legate de aceste ecuații ale fizicii cuantice este mult mai abstractă decît în cazul cîmpului electromagnetic și gravitațional ; ele ne furnizează numai mijloacele matematice de a soluționa probleme cu caracter statistic.

Pînă acum am considerat electronul într-un cîmp exterior. Dar dacă am avea de-a face nu cu un electron, sarcina cea mai mică posibilă, ci cu o sarcină considerabilă care contine miliarde de electroni, atunci am putea să nu ținem cont de toată teoria cuantică și să tratăm problema potrivit fizicii vechi, precuantice. Vorbind, de exemplu, despre curentul care trece printr-o sîrmă, de un conductor încărcat, de o undă electromagnetică, putem folosi vechea noastră fizică simplă conținută în ecuațiile lui Maxwell. Nu mai putem face aceasta cînd avem de a face cu efectul fotoelectric, cu intensitatea liniilor spectrale, cu radioactivitatea, cu difracția undelor electronice și cu multe alte fenomene în care se manifestă

caracterul cuantic al materiei și energiei. În cazul acesta, ca să zicem așa, trebuie să urcăm încă un etaj. În vreme ce în fizica clasică vorbeam despre pozițiile și vitezele unei particule, acum trebuie să considerăm unde de probabilitate într-un continuum tridimensional, care corespunde problemei unei singure particule.

Fizica cuantică ne dă prescripțiile ei pentru tratarea unei probleme dacă știm să tratăm o problemă analogă din punct de vedere al fizicii clasice.

Pentru o singură particulă elementară, electron sau foton, avem unda de probabilitate într-un continuum tridimensional, undă care caracterizează comportarea statistică a sistemului în cazul unor experiențe repetate des. Cum rămîne însă cînd avem de-a face nu cu una ci cu două particule care interacționează, de exemplu cu doi electroni, un electron și un foton sau un electron și un nucleu? Nu putem să le tratăm independent descriind pe fiecare printr-o undă de probabilitate în trei dimensiuni, tocmai din cauza interacțiunii lor. Nu este greu să ne dăm seama cum poate fi descris în fizica cuantică un sistem compus din două particule care interacționează. Nu avem decît să coborîm la etajul inferior, să ne întoarcem pentru o clipă la fizica clasică. Poziția a două puncte materiale în spațiu este caracterizată, în fiecare moment, prin șase numere, cîte trei pentru fiecare punct. Toate pozițiile posibile ale celor două puncte materiale formează deci un continuum șasedimensional și nu un continuum tridimensional ca în cazul unui singur punct. Urcînd acum din nou la etajul superior, la fizica cuantică, corespondentul este unda de probabilitate într-un continuum șasedimensional și nu într-un continuum tridimensional ca în cazul unei particule. Asemănător pentru trei, patru sau mai multe particule, undele de probabilitate respective vor fi funcțiuni definite într-un continuum cu nouă, douăsprezece sau mai multe dimensiuni.

Aceasta arată limpede că undele de probabilitate sînt mai abstracte decît cîmpul electromagnetic și gravitațional care există și se propagă în spațiul nostru tridimensional. Continuumul multidimensional formează domeniul de definiție pentru undele de probabilitate și numai pen-

tru o singură particulă trebuie ca numărul de dimensiuni să fie egal cu acela al spațiului fizic. Singura semnificație fizică a undei de probabilitate este că ea ne permite, atît în cazul mai multor particule cît și în cazul uneia singure, să soluționăm acele probleme statistice care au sens. Astfel, de exemplu, pentru un electron putem întreba care este probabilitatea de a-l întîlni într-un anumit punct? În cazul a două particule, ne-am putea întreba care este probabilitatea de a întîlni, la un moment dat, cele două particule în două puncte anumite?

Primul pas cu care ne-am abătut de la fizica clasică a fost părăsirea descrierii cazurilor individuale ca evenimente obiective în spațiu și timp, și adoptarea metodei statistice furnizată de unda de probabilitate. O dată ce am pășit pe această cale, sîntem obligați să ne adîncim în abstracție. Trebuie să introducem unde de probabilitate cu multe dimensiuni, corespunzătoare problemei mai multor particule.

Pentru simplicitate, să numim acum fizică clasică tot ce nu este mecanică cuantică. Fizica clasică și cea cuantică se deosebesc radical. Obiectivul fizicii clasice este descrierea unor obiecte care există în spațiu și formularea legilor care guvernează schimbările lor în timp. Dar fenomenele care pun în evidență dubla natură, de particulă și de undă, atît a materiei cît și a radiației, caracterul evident statistic al proceselor elementare, cum ar fi dezintegrarea radioactivă, difracția, emisia liniilor spectrale și multe altele, ne-au constrîns să părăsim această concepție. Fizica cuantică nu-și propune să descrie obiecte individuale în spațiu și variațiile lor în timp. În fizica cuantică nu este loc pentru afirmații de tipul : obiectul acesta este „așa și pe dincolo" sau „are cutare proprietate". În locul lor avem afirmații de tipul : există cutare probabilitate ca un obiect individual să fie „așa și pe dincolo" sau să aibă „cutare proprietate". În fizica cuantică nu este loc pentru legi care guvernează variațiile în timp ale unui obiect individual. În locul lor avem legi care guvernează variațiile în timp ale probabilității. Numai această schimbare fundamentală introdusă în fizică de teoria cuantelor a făcut posibilă explicarea adecuată a caracterului vădit discontinuu și statistic al evenimentelor din do-

meniul fenomenelor în care își manifestă existența cuantele de materie și radiație.

Apar însă probleme și mai grele care nu au fost încă rezolvate pe deplin nici pînă astăzi. Vom menționa numai unele din aceste probleme nerezolvate. Știința nu este și nu va fi niciodată o carte terminată ; fiecare progres important ridică noi probleme. Fiecare dezvoltare ridică, cu timpul, dificultăți și mai adînci.

Știm că în cazul simplu al uneia sau a mai multor particule, putem trece de la descrierea clasică la cea cuantică, de la descrierea obiectivă a evenimentelor în spațiu și în timp la undele de probabilitate. Dar să ne amintim noțiunea de cîmp extrem de importantă în fizica clasică. Cum putem descrie interacțiunea dintre cuantele elementare de materie și cîmp? Dacă pentru descrierea cuantică a zece particule este necesară o undă de probabilitate definită într-un spațiu cu treizeci de dimensiuni, atunci pentru descrierea cuantică a unui cîmp ar fi necesară o undă de probabilitate definită într-un spațiu cu un număr infinit de dimensiuni. Trecerea de la conceptul clasic de cîmp la problema cuantică corespunzătoare, a undelor de probabilitate, reprezintă un pas foarte greu. În cazul de față, a urca un etaj nu este o sarcină ușoară și toate soluțiile acestei probleme propuse pînă acum trebuie considerate nesatisfăcătoare. Mai există încă o problemă fundamentală. În toate raționamentele noastre privitoare la trecerea de la fizica clasică la cea cuantică am făcut uz de descrierea veche, prerelativistă, în care spațiul și timpul erau tratate separat. Or, dacă luăm ca punct de plecare descrierea clasică propusă de teoria relativității, atunci trecerea la problema cuantică se complică și mai mult. Problema aceasta a fost atacată de fizica modernă, dar soluția ei este încă departe de a fi completă și satisfăcătoare. Construirea unei fizici consistente a particulelor grele cari alcătuiesc nucleele întîmpină, de asemenea, dificultăți. În ciuda abundenței datelor experimentale și a numeroaselor încercări de a arunca lumină asupra problemelor fizicii nucleare, în domeniul acesta bîjbîim încă în întuneric chiar în problemele fundamentale.

Fără îndoială că fizica cuantică a explicat o mare varietate de fapte, în majoritatea cazurilor realizîndu-se o concordanță strălucită între teorie și observație. Noua fizică cuantică ne îndepărtează și mai mult de vechea concepție mecanicistă și o revenire la vechile poziții pare mai puțin probabilă ca oricînd. Totuși, nu există îndoială asupra faptului că fizica cuantică trebuie să rămînă bazată tot pe două concepte : pe materie și pe cîmp. Ea este, în acest sens, o teorie dualistă și nu poate duce nici cu un pas mai aproape de realizare vechea noastră problemă de a reduce totul la conceptul de cîmp. Dezvoltarea viitoare se va face oare pe făgașul trasat de fizica cuantică sau se vor introduce noi idei revoluționare în fizică? Va face drumul progresului o nouă cotitură cum a mai făcut de atîtea ori în trecut?

În cursul anilor din urmă, toate dificultățile fizicii cuantice au fost concentrate în jurul a cîtorva puncte principale. Fizica așteaptă cu nerăbdare înlăturarea lor. Dar nu avem nici un mijloc de a prevedea cînd și în ce sens se vor risipi complicațiile actuale.

§ 41. FIZICA ȘI REALITATEA

Care sînt concluziile generale ce se desprind din dezvoltarea fizicii așa cum a fost ea schițată aici, sub forma expunerii ideilor fundamentale?

Știința nu este asemenea unei colecții de legi, un catalog de fapte disparate. Ea este o creație a minții omenești, făurită din idei și noțiuni liber inventate. Teoriile fizice încearcă să ne dea o imagine a realității și să stabilească legătura ei cu lumea vastă a impresiilor noastre. Așadar, construcțiile minții noastre nu sînt justificate decît în măsura și în sensul în care teoriile noastre reușesc să realizeze această legătură.

Am cunoscut realități noi create de progresul fizicii. Dar acest lanț al creației poate fi urmărit mult în afara punctului de plecare al fizicii. Unul dintre conceptele cele mai primitive este cel de obiect. Noțiunile de copac, cal, corp material oarecare, sînt creații elaborate pe baza experienței, chiar dacă impresiile din care derivă au un

caracter primar în comparație cu lumea fenomenelor fizice. O pisică care se joacă cu un șoarece își creează și ea realitatea ei primară, printr-un proces mintal. Faptul că pisica reacționează asemănător față de fiecare șoarece care-i iese în cale denotă că ea își creează noțiuni și teorii care o călăuzesc în lumea ei proprie de impresii sensibile.

„Trei copaci" reprezintă un lucru diferit de „doi copaci" ; de asemenea „doi copaci" reprezintă un lucru diferit de „două pietre". Prin urmare noțiunile corespunzătoare numerelor pure 2, 3, 4..., desprinse de obiectele din care au derivat, sînt creații raționale, care descriu realitatea lumii noastre.

Sentimentul subiectiv (psihologic) de timp ne dă posibilitatea să ne ordonăm impresiile, să stabilim dacă un eveniment precede un altul. Dar a lega de fiecare moment un număr cu ajutorul unui ceasornic, a privi timpul ca un continuum unidimensional reprezintă o adevărată invenție ; tot astfel și conceptele de geometrie euclidiană și neeuclidiană, precum și interpretarea spațiului nostru ca un continuum tridimensional.

Fizica a început, în fapt, cu inventarea masei, a forței și a sistemului inerțial. Aceste concepte sînt toate invenții libere. Ele au condus la formularea concepției mecaniciste. Pentru fizicianul de la începutul secolului al XIX-lea realitatea lumii exterioare se reducea la particule între care acționau forțe simple dependente numai de distanță. El a încercat să-și salveze, un timp cît mai îndelungat, convingerea că va izbuti să explice toate evenimentele din natură exclusiv cu aceste concepte fundamentale ale realității. Dificultățile provocate de deviația acului magnetic și cele legate de structura eterului ne-au obligat să creăm o realitate mai subtilă. Astfel s-a născut importanta invenție a cîmpului electromagnetic. A fost necesară o imaginație științifică îndrăzneață pentru a sezisa faptul că nu comportarea corpurilor ci comportarea a ceva ce se află între ele, adică a cîmpului, este esențială pentru ordonarea și înțelegerea evenimentelor.

Evoluția ulterioară a distrus vechile concepte și a creat altele noi. Timpul absolut și sistemul de coordo-

nate inerțial au fost părăsite de teoria relativității. Fondul pe care se desfășoară toate evenimentele a încetat astfel să fie timpul unidimensional și continuumul tridimensional al spațiului, locul lor luîndu-l continuumul cuadridimensional spațiu-timp, o altă invenție liberă, cu noi proprietăți de transformare. Sistemul inerțial de coordonate a încetat să fie necesar. Orice sistem de coordonate a devenit deopotrivă de adecuat pentru descrierea evenimentelor din natură.

Teoria cuantelor a creat, de asemenea, aspecte noi și esențiale ale realității noastre ; discontinuitatea a luat locul continuității. În locul legilor care guvernează indivizii au apărut legi de probabilitate.

Chiar dacă realitatea creată de fizica modernă este departe de realitatea începuturilor, obiectivul ei, ca de altfel al oricărei teorii fizice, rămîne totdeauna același.

Cu ajutorul teoriilor fizice încercăm să ne croim o potecă prin labirintul faptelor observate, să ordonăm și să înțelegem lumea impresiilor noastre sensibile. Faptele observate căutăm să le deducem în mod logic din conceptul nostru de realitate. Dar fără convingerea că este posibilă redarea realității cu construcțiile noastre teoretice, fără credința în armonia interioară a lumii noastre, nu ar putea exista știință. Această credință este și va rămîne pentru totdeauna motorul fundamental al oricărei creații științifice. De-a lungul tuturor eforturilor noastre, în fiecare luptă dramatică între concepțiile vechi și cele noi, recunoaștem același îndemn nestăvilit spre cunoaștere, aceeași credință neclintită în armonia lumii noastre, întărită din ce în ce mai mult de obstacolele tot mai mari, care se ridică în calea înțelegerii.

Rezumăm :

Varietatea faptelor din domeniul fenomenelor atomice ne constrînge să inventăm încă o dată noi concepte fizice. Materia are o structură granulară ; ea este compusă din particule elementare, din cuante elementare de materie. Prin urmare, sarcina electrică are o structură granulară și, faptul cel mai important din punctul de vedere al teoriei cuantelor este că această structură o are și

energia. Fotonii sînt cuantele de energie din care este compusă lumina.

Lumina este o undă sau o ploaie de fotoni? Un fascicul de electroni este o ploaie de particule elementare sau o undă? Aceste întrebări fundamentale sînt impuse fizicienilor de către experiența. Căutînd un răspuns la aceste întrebări, trebuie să abandonăm descrierea evenimentelor atomice ca petrecîndu-se în spațiu și timp, fiind necesar să ne îndepărtăm și mai mult de vechea concepție mecanicistă. Fizica cuantică formulează legi care guvernează mulțimi, nu indivizi. Ea nu descrie proprietăți ci probabilități ; ea nu formulează legi care să descrie viitorul sistemului ci legi care guvernează variațiile în timp ale probabilităților și care se referă la ansambluri mari de indivizi.

TABLA DE MATERII

Confruntarea traducerii : Prof. Dr. Plăcințeanu I. I.
Controlul științific al traducerii: Prof. Dr. Ing. Răduleț Remus, membru coresp. al Ac. R.P.R.

Responsabil de carte : Rogai Eliferie
Tehnoredactor : Bălăiță Titel
Corector responsabil : Ianculescu Maria

Dat la cules 20.09 1957. Bun de tipar 12.11.1957. Hîrtie semivelină de 65g/m², 54x84/16. Coli editoriale 12,96. Coli de tipar 15,375. Planșe tipo 3. Comanda R U 3104 A. 7061 ; E 10925. Indicele de clasificare pentru bibliotecile mari și mici 53.

Tiparul executat la Întreprinderea Poligrafică „Apărarea Patriei“ str. Izvor 137, București R P.R.

C. 1652

